UNIVERSITE DU HAVRE

Thèse pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITÉ DU HAVRE

Spécialité : **Informatique & Automatique.**

Préparée :

Au Laboratoire LMAH, Université du Havre.

Présentée par :

Nesrine SMATA épouse BENMANSOUR

Ingénieur en automatique

CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION ET À L'ANALYSE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE EN UTILISANT LES RÉSEAUX DE PETRI.

Soutenue publiquement le 21 Novembre 2013 devant le jury d'examen :

Président :

- Hugues MOLET, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Rapporteurs :

- Mohamed DJEMAI, Professeur des Universités, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC).
- Ahmed RACHID, Professeur des universités, LTI, Université de Picardie Jules Verne d'Amiens.

Examinateur :

- Adnan YASSINE, Professeur des universités, Université du Havre.

Directeur de thèse :

- Jaouad BOUKACHOUR, Maître de conférences HDR, Université du Havre.

Co-encadrante de thèse :

- Dalila BOUDEBOUS, Maître de conférences, Université du Havre.

AVANT-PROPOS

Les travaux de recherche concernés par cette thèse sont menés à l'université du Havre, dans le Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH), au sein d'un groupe qui est une composante de l'équipe « Optimisation et Recherche Opérationnelle ». Un des axes de recherche de ce groupe est principalement orienté vers les problèmes de l'intégration de la chaîne logistique globale. Dans cette thèse, les efforts se focalisent sur la problématique de la modélisation, de la simulation, et de l'évaluation de performance de la chaîne logistique globale.

Ma thèse a été co-dirigée par Mme Dalila BOUDEBOUS et par M. Jaouad BOUKACHOUR. Le contexte général de notre étude est celui de la gestion des flux dans les chaînes logistiques. Nous nous intéressons à la modélisation d'une chaîne logistique, à l'analyse de son comportement, au pilotage de ses flux et à l'évaluation de sa performance tout en nous fondant sur le potentiel des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable. Ce sujet est d'actualité et ces travaux se situent pleinement dans les préoccupations de plusieurs projets.

A la mémoire de mon père

REMERCIEMENTS

Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de thèse.

Je voudrais tout d'abord à exprimer mes profonds remerciements à M. Jaouad BOUKACHOUR, Maître de conférences HDR à l'université du Havre, directeur de cette thèse, pour son encadrement, ses conseils, sa confiance et pour le soutien qu'il a su m'accorder durant toutes ces années.

Je voudrais également manifester toute ma reconnaissance à ma co-encadrante de thèse, Mme Dalila BOUDEBOUS, maître de conférences à l'Université du Havre pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses encouragements amicaux ainsi que la confiance et l'autonomie qu'elle m'a accordée durant mes années de thèse.

Je tiens à remercier M. Mohammed DJEMAI, Professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC) et M. Ahmed RACHID, Professeur à l'université de Picardie Jules Verne d'Amiens, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. Je leur suis également très reconnaissant pour leur lecture approfondie du mémoire ainsi que pour les remarques et les suggestions qu'ils ont su apportées.

Je tiens à remercier M. Hugues MOLET, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury lors de ma soutenance.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à M. Adnan YASSINE, Professeur à l'université du Havre d'avoir accepté d'examiner cette thèse et d'apporter son point de vue sur ce travail.

Merci à tous les membres de l'équipe pour l'ambiance cordiale qu'ils ont su faire régner au sein du laboratoire. Et un grand merci à toutes mes amies.

Je remercie également M. Cherif TOLBA, Maître de conférences HDR à l'université d'Annaba pour ses conseils et les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir.

Mes remerciements vont également à ma mère pour m'avoir donné son amour inconditionnel, sa tendresse, son attention, ses encouragements.

Je remercie également mes sœurs, mes frères, mon beau père, ma belle mère, mes belles sœurs, mes beaux frères, mes nièces, mes neveux et ma petite nièce, pour leur soutien permanent malgré la distance qui nous sépare.

Ce mémoire n'aurait jamais pu exister sans celui qui a partagé mes doutes, mes joies, et surtout ma vie. Un grand merci Senouci.

Je tiens enfin à remercier mon petit Anass qui a été aussi pour moi un vrai rayon de soleil et une source constante de motivation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE……1

Chapitre I : *« La chaîne logistique globale : concepts et définitions »* ……5

1. INTRODUCTION 7
2. CONCEPT DE LA CHAINE LOGISTIQUE 8
   - 2.1 De la logistique à la chaîne logistique 8
   - 2.2 Définitions de la chaîne logistique 8
   - 2.3 Notion de flux dans la chaîne logistique 12
     - 2.3.1 Le flux physique (de matière) 12
     - 2.3.2 Le flux d'information 12
     - 2.3.3 Le flux financier 13
   - 2.4 Les acteurs de la chaîne logistique 14
     - 2.4.1 Le fournisseur 14
     - 2.4.2 Le producteur 14
     - 2.4.3 Le distributeur 15
     - 2.4.4 Le transporteur 16
     - 2.4.5 Les détaillants ou consommateurs 16
   - 2.5 Structure d'une chaîne logistique 16
     - 2.5.1 La structure en Série 16
     - 2.5.2 La structure Divergente 17
     - 2.5.3 La structure Convergente 17
     - 2.5.4 La structure Dyadique 17
     - 2.5.5 La structure en Réseau 17
3. GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE 18
   - 3.1 Niveaux décisionnels pour la gestion des chaînes logistiques (SCM) 21
     - 3.1.1 Les décisions stratégiques (décisions de conception) 21
     - 3.1.2 Les décisions tactiques (décisions de planification) 22
     - 3.1.3 Les décisions opérationnelles (pilotage des flux, évaluation de la performance et ordonnancement) 23
4. PILOTAGE DE FLUX DANS LA CHAINE LOGISTIQUE 24
   - 4.1 Évolution de la notion de pilotage de flux dans la CL 25
     - 4.1.1 Les types d'information sur la demande 26
     - 4.1.2 Les stratégies de réponse à la demande 27
5. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCES 29
   - 5.1 Démarche d'évaluation de performance a priori et a posteriori 30
   - 5.2 Concept d'indicateur de performance 31
     - 5.2.1 Définition 31
     - 5.2.2 Classification des indicateurs de performance 32
       - *5.2.2.1 Indicateurs quantitatifs* 32
       - *5.2.2.2 Indicateurs qualitatifs* 34
6. LA NÉCESSITE DE LA MODELISATION DES CHAINES LOGISTIQUES 35
7. CONCLUSION 36

Chapitre II : « *Modélisation et analyse de la chaîne logistique : principes et difficultés* »…39

1. INTRODUCTION 41
2. APPROCHES DE MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE 42
   2.1 Approche d'optimisation mathématique 42
   2.2 Approche de simulation 44
      2.2.1 La simulation à événements discrets 46
      2.2.2 La simulation continue 48
         2.2.2.1 *Bond Graph* 49
         2.2.2.2 *Réseaux de Petri Continus* 49
         2.2.2.3 *Dynamique des Systèmes* 51
      2.2.3 La simulation orientée objet 53
      2.2.4 La simulation orientée Agent 56
   2.3 Approche organisationnelle 57
      2.3.1 Approche hiérarchique 57
         2.3.1.1 *L'approche cartésienne* 57
         2.3.1.2 *L'approche systémique* 58
      2.3.2 Approche hétérarchique 59
         2.3.2.1 *L'approche par processus* 60
         2.3.2.2 *L'approche holonique* 60
         2.3.2.3 *Rapproches en émergences* 60
   2.4 Approche économique 61
   2.5 Offre logicielle 62
3. MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME DE MESURE DES PERFORMANCES 64
   3.1 La méthode ECOGRAI 1990 64
   3.2 La méthode ABC – ABM 1991 65
   3.3 Le Balanced ScoreCards (BSC) 1992 66
   3.4 Le modèle SCOR 2000 67
   3.5 Synthèse de l'analyse bibliographique 68
4. LES POLITIQUES DE PILOTAGE DE FLUX 69
   4.1 Les politiques de pilotage par renouvellement de la consommation 70
      4.1.1 Politiques d'approvisionnement et de stockage 70
         4.1.1.1 *Politique à point de commande (r, Q)* 71
         4.1.1.2 *Politique à recomplètement périodique (T, S)* 71
         4.1.1.3 *Politique à point de commande, niveau de recomplètement (s, S)* 71
         4.1.1.4 *Politique (T, r, S)* 72
         4.1.1.5 *Politique (T, r, Q)* 72
      4.1.2 Politiques de type Kanban 72
         4.1.2.1 *Principe de la politique Kanban* 73
         4.1.2.2 *Extensions de la politique Kanban* 74
            a. Politique Kanban Généralisée 74
            b. Politique Kanban Etendue 75
   4.2 Politiques de pilotage par les besoins futurs 76
      4.2.1 Les politiques du type planification des besoins en composants MRP 76
      4.2.2 Politiques de gestion de stock sur prévisions 77
5. CONCLUSION 78

Chapitre III : « *Modélisation de la chaîne logistique par les réseaux de Petri Continus à vitesse variable* »…..……81

1. INTRODUCTION 83
2. PERIMETRE DE L'ETUDE 84
   2.1 Niveau de la modélisation retenue 84

2.2 Nature de la modélisation retenue 85
2.3 Finalité de la modélisation retenue 86
3. INTRODUCTION A LA MODELISATION PAR RdPCV 86
3.1 Concepts de base de la modélisation par RdP 87
3.1.1 Représentation d'un RdP 87
3.1.2 Evolution d'un RdP 88
3.1.3 Equation fondamentale 89
3.2 Différentes extensions de RdP 89
3.2.1 Les RdPs temporisés 89
3.2.2 Les réseaux de Petri continus (RdPCs) 90
3.2.2.1 Le modèle RdP Continu à Vitesses Constantes (RdPCC) 91
3.2.2.2 Le modèle RdP Continu à Vitesses Variables (RdPCV) 92
3.2.2.3 Le modèle RdPC Asymptotique 92
3.2.2.4 Le modèle RdPC à Vitesses Fonction du Temps 93
3.2.3 Synthèse sur le choix des RdPCV 93
4. APPORTS DE L'OUTIL RDPCV DANS L'ETUDE DE LA CHAINE LOGISTIQUE 94
5. MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE PAR LES RdPCVs 96
5.1 Modèles RdPCVs des nœuds de la chaîne logistique 97
5.1.1 Structure générique d'un nœud dans la CL 97
5.1.2 Modèle RdPCV d'un acteur de la CL 105
5.1.2.1 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Kanban 105
5.1.2.2 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Finite-buffer 112
5.1.3 Cas spécifique de l'acteur 114
5.1.3.1 Cas de l'acteur fournisseur 114
5.1.3.2 Cas de l'acteur producteur 115
A. Modèle RdPCV de l'acteur fabricateur 116
B. Modèle RdPCV de l'acteur assembleur 116
C. Modèle RdPCV de l'acteur désassembleur 119
5.1.3.3 Cas de l'acteur distributeur 121
A. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec un entrepôt 121
a. Typologie de distribution convergente 122
b. Typologie de distribution divergente 125
c. Typologie de distribution convergente/divergente 127
B. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec une plate-forme 128
5.1.3.4 Cas de l'acteur client final 129
5.1.4 Prise en considération du cas multi-produit 131
5.2 Modèles RdPCVs des arcs de la chaîne logistique 133
5.3 Modèle RdPCV globale de la chaîne logistique 136
6. CONCLUSION 139

Chapitre IV : « *Exploitation du modèle développé pour l'analyse dynamique et l'évaluation de performance* »……141

1. INTRODUCTION 142
2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE 142
3. PRINCIPALES VARIABLES ET INDICATEURS MIS EN JEU PAR LE MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE 143
4. REPRODUCTION DU PHENOMENE DE L'ECOULEMENT DES FLUX DE PRODUITS ET D'INFORMATION DANS LA CHAINE LOGISTIQUE 144
5. EVALUATION DE PERFORMANCE DE LA CHAINE LOGISTIQUE 159
5.1 Sensibilité du réseau logistique étudié aux conditions initiales 160
5.2 Analyse des effets de la variation de la taille des boucles Kanbans 166
5.3 Analyse des effets de la variation de la vitesse de transport 169
5.4 Analyse des effets de la variation des demandes clients finaux 172
6. CONCLUSION 174

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES……...…….176
BIBLIOGRAPHIES……..…….182

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : « *La chaîne logistique globale : concepts et définitions* »

Figure I.1 Schéma représentatif de la chaîne logistique centrée sur le fonctionnement d'une entreprise [Kearney, 1994]..... 11

Figure I.2 Schéma représentatif de la chaîne logistique considérée comme un ensemble d'installations [Lee et Billington, 1993]..... 11

Figure I.3 Schéma représentatif de la chaîne logistique considérée comme un réseau de partenaires [Taylur et al., 1999]..... 12

Figure I.4 Découpage traditionnel des flux de matière et d'information dans la chaîne selon [Greis et Kasarda, 1997]..... 13

Figure I.5 Répartition des flux dans la chaîne logistique selon [Greis et Kasarda, 1997]..... 13

Figure I.6 Les différentes structures typiques de la chaîne logistique..... 18

Figure I.7 Hiérarchisation des problématiques de la chaîne logistique..... 21

Figure I.8 Matrice de planification de la chaîne logistique [Stadtler et Kilger, 2000]..... 24

Figure I.9 Les décisions en pilotage de flux dans une chaîne logistique [Babaï et Dallery, 2004]..... 25

Figure I.10 Les principaux types de stratégies de réponse à la demande selon le point de pénétration..... 28

Figure I.11 La boucle de pilotage à travers l'indicateur de performance [Clivillé, 2004]..... 32

Chapitre II : « *Modélisation et analyse de la chaîne logistique : principes et difficultés* ».

Figure II.1 Axes de modélisation UML..... 55

Figure II.2 Représentation d'un SMA selon [Ferber, 1995]..... 56

Figure II.3 Représentation d'un système..... 58

Figure II.4 Représentation d'un système sociotechnique selon l'approche systémique [Le Moigne, 1977]..... 59

Figure II.5 Les différentes approches de modélisation des chaîne logistique..... 63

Figure II.6 Les quatre axes du Balanced Scorecard [Kaplan & Norton, 1992]..... 66

Figure II.7 Le modèle SCOR version 8.0 (Source SCC)..... 67

Figure II.8 Principe de politique de la gestion d'approvisionnement [Arda, 2008]..... 71

Figure II.9 La politique Kanban à deux étages..... 73

Figure II.10 La politique Kanban Généralisée à deux étages..... 75

Figure II.11 La politique Kanban Etendue à deux étages..... 75

Chapitre III : « *Modélisation de la chaîne logistique par les réseaux de Petri Continus à vitesse variable* ».

Figure III.1 Positionnement de l'approche de modélisation retenue par rapport aux nombreux travaux de recherche dans le domaine…….. 86

Figure III.2. Représentation d'un RdP…….. 88

Figure III.3 Station avec vitesse de franchissement constante (RdPCC)…… 91

Figure III.4 Station avec vitesse de franchissement variable (RdPCV)…… 92

Figure III.5 Exemple de RdP et la superposition du son marquage continu et discret (RdPT-temporisé/RdPCC/RdPCV…… 93

Figure III.6 Illustration systémique de la CL sous forme d'un réseau…… 96

Figure III.7 Schéma représentatif des flux d'entrée et de sortie d'un acteur dans la CL.. 98

Figure III.8 Schéma représentatif de l'interconnexion des acteurs de la CL avec une structure en série gérée en flux tiré…….. 99

Figure III.9 Illustration systémique de l'acteur……. 100

Figure III.10 Structure interne du système physique d'un acteur……..... 101

Figure III.11 Assimilation de la mobilité des produits à travers le système physique d'un acteur à un écoulement de fluides dans un système à réservoirs…… 102

Figure III.12 Structure générique d'un acteur dans la CL……. 104

Figure III.13 Modèle RdPCV d'un acteur dans la CL piloté par Kanban…… 106

Figure III.14 Modèle RdPCV d'un acteur dans la CL piloté par Finite-buffer……. 113

Figure III.15 Modèle RdPCV d'un acteur fournisseur dans la chaîne logistique piloté par Kanban…… 115

Figure III.16 Modèle RdPCV d'un acteur assembleur dans la CL piloté par Kanban.. 117

Figure III.17 Schéma représentatif d'un acteur assembleur en interaction avec son environnement……..……...…….. 117

Figure III.18 Modèle RdPCV d'un acteur désassembleur dans la CL piloté par Kanban…… 119

Figure III.19 Schéma représentatif d'un acteur désassembleur en interaction avec son environnement……..……. 120

Figure III.20 Principales typologies de distribution……..... 122

Figure III.21 Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est convergente……..…..... 123

Figure III.22 Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est divergente…….. 126

Figure III.23 Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est convergente / divergente……...…… 128

Figure III.24 Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec une plate-forme……...…… 129

Figure III.25 Modèle RdPCV d'un client final en interaction avec son environnement dans la CL……...…….. 130

Figure III.26 Modèle RdPCV d'un acteur capable de transformer différents types de flux de produits dans la chaîne logistique……..... 133

Figure III.27 Modèle RdPCV du transport en interaction avec son environnement dans la chaîne logistique……...…. 136

Chapitre IV : *« Exploitation du modèle développé pour l'analyse dynamique et l'évaluation de performance».*

Figure IV.1 Structure typique d'une chaîne logistique…….. 144

Figure IV.2 Modèle RdPCV global de la chaîne logistique de la figure IV.1…… 146

Figure IV.3. Evolution en fonction du temps de : l'engagement Rk12 du distributeur 1et sa demande de réapprovisionnement Rk11 ainsi que les niveaux de ses stocks amont et aval m30 et m32 ; le niveau du stock aval m26 de l'assembleur et la quantité m27de produits finis destinée vers le distributeur 1; la demande de réapprovisionnement Rk13du distributeur 2……. 148

Figure IV.4 Evolution en fonction du temps des demandes de distributeurs et de la quantité de produits dans le stock aval de l'assembleur et sa répartition entre les deux distributeurs en aval……...…... 150

Figure IV.5 Evolution en fonction du temps de : l'engagement Rk14 du distributeur 2 et sa demande de réapprovisionnement Rk13 ainsi que les niveaux de ses stocks amont et aval m39 et m41 ; le niveau du stock aval m26 de l'assembleur et la quantité m37de produits finis destinée vers le distributeur 2……. 152

Figure IV.6 Évolution instantanée moyenne des débits d'écoulement des flux de produits entre les différents acteurs et à travers leur processus de transformation…...… 153

Figure IV.7 Evolution en fonction du temps de la demande d'assemblage et des quantités de produits dans les stocks amont et aval et en cours d'assemblage…….. 154

Figure IV.8 Courbes séparées avec zoom de l'évolution en fonction du temps de la demande d'assemblage et des quantités de produits dans les stocks amont et aval et en cours d'assemblage…….…..……. 155

Figure IV.9 Evolutions de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de respecter au mieux une répartition constante de flux entre les distributeurs $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\ , 0.6)$……..... 156

Figure IV.10 Evolutions de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de limiter au maximum l'attente des commandes (réadaptation continue au cours du temps des fractions de répartition entre les deux distributeurs)…….… 157

Figure IV.11 Impact de l'absence de la demande du distributeur 1 à l'instant t=250 u.t sur l'évolution de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de respecter au mieux une répartition constante de flux entre les distributeurs $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\ , 0.6)$……... 157

Figure IV.12 Impact de l'absence de la demande du distributeur 1 à l'instant t=250 u.t sur l'évolution de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de limiter au maximum l'attente des commandes…….…. 158

Figure IV.13 Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime de rupture……... 162

Figure IV.14 Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime équilibré…….. 163

Figure IV.15 Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime surchargé……..….. 163

Figure IV.16 Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime de rupture……...…… 164

Figure IV.17 Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime équilibré…..……...…… 165
Figure IV.18 Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime surchargé…..……. 165
Figure IV.19 Taux de service clients en fonction de la taille Kanban dans toutes les boucles du réseau logistique…….. 166
Figure IV.20 Taux de service clients en fonction de la taille Kanban au niveau des fournisseurs…… 167
Figure IV.21 Taux de service clients en fonction de la taille Kanban au niveau des distributeurs……..……. 167
Figure IV.22 Niveaux de stocks des fournisseurs en fonction de leur taille Kanban….. 168
Figure IV.23 Niveaux de stocks des producteurs en fonction de la taille Kanban au niveau des fournisseurs…….……. 168
Figure IV.24 Coût total en fonction du rythme des transports……...…….. 170
Figure IV.25 : Niveaux des stocks des producteurs 1 et 2 en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs…… 170
Figure IV.26 Niveaux des stocks des distributeurs en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs……..… 171
Figure IV.27 Taux de service en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs……. 171
Figure IV.28 Temps de séjour dans le réseau en fonction de la demande du client final 1……. 172
Figure IV.29 Niveaux des stocks des distributeurs 1 et 2 en fonction de la demande du client final 1……... 173
Figure IV.30 Taux de service en fonction de la demande……...…….. 173

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Différentes définitions de la chaîne logistique.……..……..... 10
Tableau I.2 Les différentes définitions de la gestion de la chaîne logistique……..…. 20
Tableau III.1 Règles de successions utilisées pour construire le modèle RdPCV global de la chaîne logistique……... 137
Tableau IV.1 Caractéristiques de l'écoulement des flux de produits du réseau logistique de la figure IV.1…… 145
Tableau IV.2 Définition de l'indicateur de la pénurie dans les différents endroits du réseau logistique……...……. 161

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la mondialisation et la globalisation des économies, la concurrence accrue, ainsi que les mutations techniques rapides, ont poussé les entreprises à explorer de nouvelles voies pour améliorer leurs performances, et satisfaire un marché de plus en plus volatile et exigeant. Face à ces enjeux, les entreprises doivent revoir leur organisation, en s'ouvrant plus sur leur environnement extérieur. D'où l'intérêt de dépasser les frontières de l'entreprise pour intégrer les fournisseurs et les clients et, voire même les fournisseurs des fournisseurs et les clients des clients, de manière à ce que les produits demandés soient fabriqués et livrés aux bons clients, aux bons endroits, dans les bons délais et au meilleur coût, tout en profitant de la synergie des nouveaux partenaires.

C'est à partir de cette vision élargie de l'entreprise qu'est né le concept de la chaîne logistique. Cette dernière représente un avantage concurrentiel que l'entreprise cherche à pérenniser. En effet, la chaîne logistique est bien souvent un réseau d'entreprises traversé par des flux depuis les sources d'approvisionnement jusqu'au consommateur final.

Afin d'améliorer les compétences de ces entreprises collaborant dans la chaîne logistique et d'obtenir des avantages compétitifs, un nouveau concept a été développé sous le nom de « gestion de la chaîne logistique » ou « Supply Chain Management SCM » qui regroupe les conditions de la circulation des différents types de flux dans la chaîne logistique. La nouveauté dans ce concept de gestion est de revoir la chaîne logistique dans sa globalité et d'améliorer les interactions entre ses différents acteurs (entreprises), du fournisseur jusqu'au client final, afin d'obtenir une optimisation globale de l'ensemble de la chaîne.

Dans ce contexte, le Supply Chain Management est au cœur des préoccupations des décideurs dans ces chaînes, pour répondre efficacement aux opportunités de marché et assurer les niveaux de services requis par les clients finaux. Ce concept peut également être mis en

évidence à travers trois niveaux de décisions : stratégique, tactique et opérationnel sur différentes portées temporelles : long terme, moyen terme et court terme. Néanmoins, la concrétisation de ce concept de gestion n'est possible qu'à travers un modèle de la chaîne logistique permettant de décrire et de représenter ses différents aspects. En effet, la configuration d'une chaîne logistique, l'analyse de son comportement, le pilotage de ses flux et l'évaluation de ses performances sont des tâches très complexes qui ne peuvent se résumer à l'application de quelques recettes empiriques de métier ou en se basant seulement sur l'état technologique et organisationnel dans lequel se trouve la chaîne logistique et de la vision, généralement microscopique, que l'on peut en avoir [Ducq, 2007]. Disposer ainsi d'un modèle pour la chaîne logistique apporte une aide primordiale aux décideurs sur la mission de cette chaîne. Ce modèle va leur permettre d'analyser le comportement de la chaîne, de fonder une idée, de valider des objectifs, de communiquer avec les différents acteurs de la chaîne, d'évaluer la performance pour apporter un jugement ou anticiper un problème, d'argumenter une décision, de piloter l'évolution des flux de la chaîne, de choisir les politiques de pilotage adaptées à l'optimisation des critères de performance, etc.

Bien que plusieurs modèles de la chaîne logistique aient été développés, toutefois on est encore loin de trouver un modèle parfait permettant de décrire les différents phénomènes et aspects de la chaîne logistique. En effet, tous les modèles développés dans ce sens reposent sur des hypothèses simplificatrices, et aucun des modèles existants ne peut appréhender toute la complexité de la chaîne logistique, ce qui laisse le champ de recherche dans ce secteur très largement ouvert et autant de pistes de développement possibles.

C'est dans ce contexte que nous essayons d'enrichir les modèles de la chaîne logistique existants en proposant un modèle macroscopique continu et dynamique avec une démarche modulaire et générique tout en se fondant sur le potentiel des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable (RdPCV). Ce modèle permet d'intégrer à la fois l'aspect physique, informationnel et décisionnel. Le choix de l'outil RdPCV est lié essentiellement d'un côté, à la volonté de pouvoir exploiter les différentes techniques d'analyse issues de l'automatique continue qui permettent dans ce contexte, de la chaîne logistique qui est un système à grande échelle mettant en jeu un grand nombre d'entités, d'augmenter considérablement l'efficacité du calcul et de réduire la taille de l'espace d'état. Ce qui permet de pallier les problèmes d'explosion combinatoire inhérents à la taille importante de la chaîne. D'un autre côté, ce choix permet une modélisation globale de la chaîne logistique à travers une description à la fois graphique et analytique du comportement dynamique des différents flux. Ce modèle

permet à la fois d'étudier les performances de la chaîne et de développer des stratégies de pilotage de flux et de contrôle d'une manière cohérente en tenant compte de l'état global de la chaîne.

La thèse est organisée en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous situerons le contexte de notre étude en mettant en évidence les problèmes qu'affrontent les gestionnaires de la chaîne logistique d'aujourd'hui. Nous proposerons ainsi une analyse thématique sur le concept de la chaîne logistique et plus particulièrement sur les aspects de gestion de cette chaîne. Une telle analyse fournit les éléments nécessaires à la formulation, et à la compréhension de notre problématique ainsi qu'à notre développement.

Dans le deuxième chapitre, nous passerons tout d'abord en revue les différentes approches de modélisation de la chaîne logistique afin de montrer comment elles appréhendent la complexité de la chaîne tout en expliquant pour chacune son principe général et ses principales caractéristiques. Ensuite, nous donnerons un aperçu sur les différents modèles de références existants permettant l'évaluation de la performance de la chaîne logistique. Notre objectif est de souligner les principaux éléments sur lesquels s'appuie un système d'évaluation de la performance. Enfin, nous aborderons les principales politiques de pilotage de flux dans la chaîne logistique. Nous y décrirons le principe de fonctionnement, les contextes et les conditions de mise en œuvre de chaque politique.

Dans le troisième chapitre, nous délimiterons tout d'abord le contexte et le périmètre de l'approche de modélisation de la chaîne logistique que nous allons proposer, tout en indiquant le niveau, la nature et la finalité de cette approche et en positionnant notre travail par rapport aux nombreux travaux de recherche dans le domaine. Ensuite, nous proposerons des concepts conceptuels suffisamment génériques pour servir de base à la présentation et à l'instanciation de l'ensemble des acteurs et des vecteurs de transport de la chaîne logistique. Enfin, nous présenterons les différents modèles RdPCVs élémentaires associés aux acteurs et aux vecteurs de transport de la chaîne logistique tout en tenant compte des spécificités de certains acteurs dans la chaîne logistique. Le modèle RdPCV global de la chaîne logistique peut être obtenu par l'assemblage de l'ensemble de ces modèles RdPCVs élémentaires tout en respectant les règles d'assemblage définies dans ce cadre afin d'assurer une certaine logique de cheminement des flux de produits dans la chaîne logistique.

Dans le quatrième chapitre, nous apporterons des éléments pour une validation du modèle RdPCV global de la chaîne logistique que nous avons proposé, ainsi nous illustrerons l'intérêt du modèle dans l'analyse du comportement et du fonctionnement de la chaîne d'un

point de vue dynamique, dans l'évaluation de la performance de la chaîne logistique et dans l'analyse des politiques de pilotage adoptées.

En conclusion, la synthèse des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette thèse est présentée et les principales perspectives de recherche sur l'exploitation, l'évolution et l'amélioration de la modélisation mise en place sont identifiées.

CHAPITRE I

LA CHAINE LOGISTIQUE : CONCEPTS ET DEFINITIONS

Sommaire

1. INTRODUCTION 7
2. CONCEPT DE LA CHAINE LOGISTIQUE 8
   2.1 De la logistique à la chaîne logistique 8
   2.2 Définitions de la chaîne logistique 8
   2.3 Notion de flux dans la chaîne logistique 12
      2.3.1 Le flux physique (de matière) 12
      2.3.2 Le flux d'information 12
      2.3.3 Le flux financier 13
   2.4 Les acteurs de la chaîne logistique 14
      2.4.1 Le fournisseur 14
      2.4.2 Le producteur 14
      2.4.3 Le distributeur 15
      2.4.4 Le transporteur 16
      2.4.5 Les détaillants ou consommateurs 16
   2.5 Structure d'une chaîne logistique 16
      2.5.1 La structure en Série 16
      2.5.2 La structure Divergente 17
      2.5.3 La structure Convergente 17
      2.5.4 La structure Dyadique 17
      2.5.5 La structure en Réseau 17
3. GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE 18
   3.1 Niveaux décisionnels pour la gestion des chaînes logistiques (SCM) 21
      3.1.1 Les décisions stratégiques (décisions de conception) 21
      3.1.2 Les décisions tactiques (décisions de planification) 22
      3.1.3 Les décisions opérationnelles (pilotage des flux, évaluation de la performance et ordonnancement) 23
4. PILOTAGE DE FLUX DANS LA CHAINE LOGISTIQUE 24
   4.1 Évolution de la notion de pilotage de flux dans la CL 25
      4.1.1 Les types d'information sur la demande 26
      4.1.2 Les stratégies de réponse à la demande 27
5. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCES 29
   5.1 Démarche d'évaluation de performance a priori et a posteriori 30
   5.2 Concept d'indicateur de performance 31
      5.2.1 Définition 31
      5.2.2 Classification des indicateurs de performance 32
         5.2.2.1 Indicateurs quantitatifs 32
         5.2.2.2 Indicateurs qualitatifs 34

6. LA NÉCESSITE DE LA MODELISATION DES CHAINES LOGISTIQUES 35
7. CONCLUSION 36

1. INTRODUCTION

Pour mieux appréhender l'impact de la mondialisation, la plupart des firmes manufacturières se voient de plus en plus contraintes d'optimiser leur chaîne logistique. En effet, pendant plusieurs décennies la préoccupation première de ces firmes a été centré sur l'amélioration de leurs productivités et leurs efficacités en intégrant des concepts informatisés dans la gestion de production tels que : CIM (Computer Integrated Manufacturing) ; FMS (les systèmes de fabrication flexible) ; la production Just-à-Temps ; etc. Cependant, du fait de la variation des besoins des clients, ces concepts ont atteint leurs limites pour améliorer les bénéfices des entreprises. Il est devenu évident, que c'est dans le cadre de l'atteinte d'un objectif global, et la considération de l'ensemble d'une chaîne au-delà des limites de l'entreprise, allant des fournisseurs des fournisseurs jusqu'aux clients des clients, que se trouve la clé du succès. Par conséquent, un nouveau paradigme est apparu nécessaire pour revoir la chaîne dans sa globalité et d'améliorer les interactions entre ses différents maillons. C'est dans ce contexte que le concept du Supply Chain Mangement « SCM » a été révélé comme une stratégie alternative et incontournable dans la coordination les flux de matière et d'information, de telle manière que la marchandise soit produite et distribuée au bon endroit, au bon moment et de façon à obtenir la bonne quantité. Néanmoins, la concrétisation de ce concept du Supply Chain Mangement n'est possible qu'à travers un modèle de la chaîne logistique permettant de décrire et de représenter les différents aspects de la chaîne logistique. Un tel modèle permet de traduire le comportement de la chaîne et de prévoir son évolution : il constitue ainsi un socle solide pour analyser son fonctionnement, évaluer ses performances et choisir les politiques de pilotage adaptées à l'optimisation des critères de performance qu'on désire mettre en avant, tous nécessaires au décideur dans sa mission [Chanut, 2005].

Le contexte général de notre étude est celui de la gestion des flux dans les chaînes logistiques. Nous nous intéressons à la modélisation d'une chaîne logistique, à l'analyse de son comportement, au pilotage de ses flux et à l'évaluation de sa performance.

Le premier chapitre de la thèse décrit le contexte de notre étude en mettant en évidence les problèmes qu'affrontent les gestionnaires des chaînes logistiques d'aujourd'hui. Nous proposons ainsi une analyse thématique sur le concept de la chaîne logistique et plus particulièrement sur les aspects de gestion de cette chaîne. Une telle analyse fournit les

éléments nécessaires à la formulation, et à la compréhension de notre problématique ainsi qu'à notre développement.

2. CONCEPT DE LA CHAINE LOGISTIQUE

2.1 De la logistique à la chaîne logistique

Le terme "logistique" vient d'un mot grec *logistikos* qui signifie l'art du raisonnement et du calcul. En effet, ce terme trouve ses origines dans le domaine militaire, où il représentait tout ce qui est nécessaire pour donner aux forces armées, au moment et à l'endroit voulus, en quantité et en qualité voulues, les moyens de vivre, de combattre et de se déplacer ainsi que d'assurer le traitement sanitaire des personnels et la réparation des matériels [Dormier et Fender, 2001]. Ce terme s'est ensuite répandu, dans le milieu industriel notamment, pour évoquer principalement la manutention et le transport des marchandises. Mais la logistique est ensuite comprise comme un lien opérationnel entre les différentes activités de l'entreprise, assurant la cohérence et la fiabilité des flux de matière, en vue de la qualité du service aux clients tout en permettant l'optimisation des ressources et la réduction des coûts. Vient ensuite la vue globale, pour laquelle la logistique devient une fonction globalisée de gestion du flux physique dans une vision complète de la chaîne Clients/Fournisseurs, et constitue une nouvelle discipline du management des entreprises représentant l'ensemble des activités internes ou externes à l'entreprise qui apportent de la valeur ajoutée aux produits et des services aux clients [François, 2007].

Dans cette section, nous évoquons les principaux fondements concernant ce concept de la logistique globale, en commençant par considérer les différentes définitions qui s'y rapportent afin de converger vers une définition qui soit en conformité avec la manière dont nos travaux ont été menés.

2.2 Définitions de la chaîne logistique

Le terme "chaîne logistique" vient de l'anglais *Supply Chain* qui signifie littéralement "chaîne d'approvisionnement". De nombreux chercheurs ont pour objet d'étude la CL, sans pour autant l'observer sous un angle unique. Chacun propose une définition suivant la discipline dont il est issu et les objectifs qui orientent son analyse. [Mentzer et al., 2001] ont proposé une revue des définitions du terme CL les plus représentatives dans le monde académique. Cette revue a été complétée récemment par [Mahmoudi et al., 2005]. Le tableau I.1 recense quelques-unes des définitions issues de la littérature, afin de comparer les

principaux points de vue des auteurs et d'en extraire les caractéristiques essentielles d'une CL.

Références	Définitions	Concepts clés
[Tahir et Darton, 2010]	Une CL est un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'informations dans les deux sens.	système, sous-traitants, producteurs, distributeurs, détaillants, clients, flux divers.
[Fénièss et Gourgand, 2006]	La CL est un ensemble ouvert traversé par des flux (financier, matériel, informationnel) composé d'entités et d'acteurs variés autonomes (fournisseurs, usines, entrepôts, distributeurs, grossistes,…) qui utilisent des ressources restreintes (capital, temps, matériel, hommes,…) et qui coordonnent leur action par un processus logistique intégré afin d'améliorer prioritairement leur performance collective (satisfaction du client final, optimisation global du fonctionnement de la CL) mais aussi à terme leur performance individuelle (maximisation du profit d'une entité).	ensemble ouvert, flux divers, entités, acteurs, ressources, processus.
[Génin, 2003]	Une CL est un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites qui coopèrent, pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des processus et activités entre les fournisseurs et les clients. Si l'objectif de satisfaction du client est le même, la complexité varie d'une CL à l'autre.	réseau, fournisseurs, clients.
[Govil et Proth, 2002]	La CL est un réseau global d'organisations qui coopèrent afin d'améliorer les flux des matériels et des informations entre les fournisseurs et les clients au plus bas coût et à la plus grande vitesse.	réseau, flux des matériels, flux des informations, fournisseurs, clients.
[Chopra et Meindl, 2001]	La CL caractérise l'ensemble des activités impactant directement ou indirectement la réalisation de la commande client. La CL n'inclut pas uniquement les producteurs et les fournisseurs mais également les transporteurs, les entrepôts, les détaillants et les clients eux-mêmes.	Ensemble d'activités, producteurs, fournisseurs, transporteurs, entrepôts, détaillants, clients.
[Mentzer et al., 2001]	La CL est un groupe d'au moins trois entités directement impliquées dans les flux amonts et avals de produits, de services, de finances et ou d'informations, qui vont d'une	groupe d'entités, flux divers, client.

	source jusqu'au client.	
[Stadtler et Kilger, 2000]	Une CL est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physique, informationnel et financier. Ces organisations peuvent être des entreprises produisant des composants, des produits intermédiaires et des produits finis, des prestataires de service logistique et même le client final lui-même.	organisations, flux divers, client.
[Handfield et Nichols, 1999]	La CL regroupe toutes les activités associées aussi bien au flux physique par transformation de biens depuis l'étape de matière première jusqu'au client final, qu'au flux informationnel.	activités, flux divers, client.
[Ganeshan et al., 1998]	Une CL est un réseau d'entités de production et de sites de distribution qui exécute les fonctions d'approvisionnement de matières, de transformation de ces matières en produits intermédiaires puis produits finis, et de distribution de ces produits finis jusqu'aux clients.	réseau, approvisionnement, transformation, distribution, client.
[Lee et Billington, 1993]	La CL est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client.	réseau, approvisionnement, transformation, distribution, client.
[Ellram, 1991]	La CL est un réseau d'entreprises en interaction, liées entre elles par divers flux, depuis l'approvisionnement en matière première jusqu'à la livraison finale, et œuvrant à la réalisation de produits ou de services pour des clients finaux.	réseau, flux, approvisionnement, livraison, client.
[Jones et Riley, 1985]	La CL regroupe la planification et le pilotage de l'ensemble du flux de matière depuis le fournisseur jusqu'au client final en passant par le producteur et le distributeur.	pilotage, flux de matière, fournisseur, producteur, distributeur, client.

Tableau I.1 *Différentes définitions de la CL.*

Bien que ces définitions mettent en évidence une cohérence quant à la finalité de la CL, elles se distinguent par leur orientation principale. La CL peut ainsi être vue :

- *Un ensemble d'entreprises,* qui sont à leur tour considérées comme une succession de fonctions qui servent à amener les produits ou les services de cet ensemble d'entreprises jusqu'à ses clients. La figure I.1 représente la CL selon cette vision.

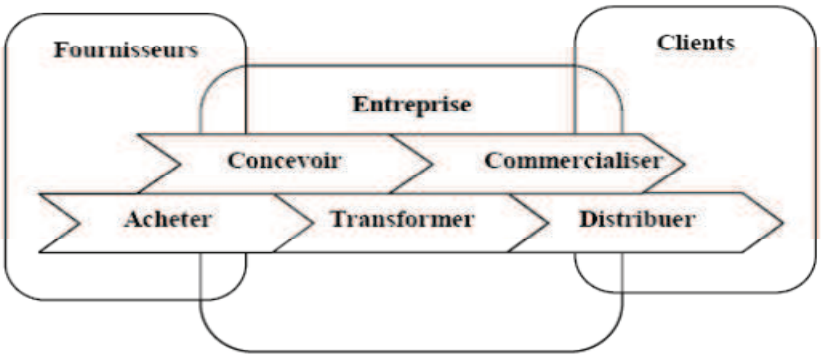


Figure I.1 *Schéma représentatif de la CL centrée sur le fonctionnement d'une entreprise [Kearney, 1994].*

- *Un ensemble d'installations* et non plus d'entreprises regroupant toutes les activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services apportés au client final. Le terme installation peut correspondre à une unité de stockage, une unité de production, une usine, un fournisseur, un centre de distribution, un entrepôt ou un client comme illustré par la figure I.2.

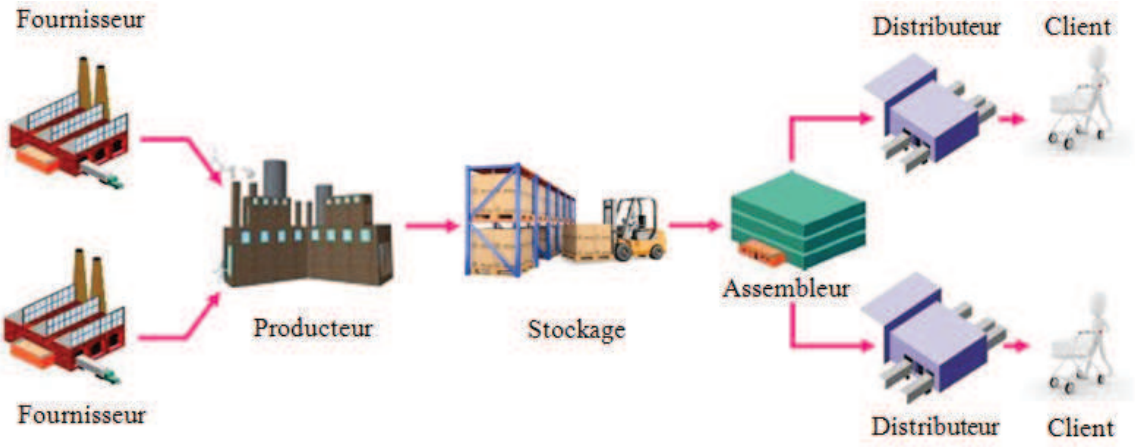


Figure I.2 *Schéma représentatif de la CL considérée comme un ensemble d'installations [Lee et Billington, 1993].*

- *Un système ouvert fonctionnant selon une logique de réseau* dont les composants sont les fournisseurs, les usines de production, les services de distribution, et les clients reliés entre eux par les flux de matières de l'amont vers l'aval (dans le sens des fournisseurs vers les clients) et les flux d'informations dans les deux sens dont l'objectif est de produire et de distribuer la marchandise au bon endroit, au bon moment et de façon à obtenir la bonne quantité tout en minimisant les coûts et en assurant le niveau de service requis par le client final [Stadtler et Kilger, 2000]. Cette définition permet d'étendre la CL au-delà des limites de l'entreprise, allant des fournisseurs des fournisseurs jusqu'aux clients des clients (cf. figure I.3) [Stevens,

1989 ; Christopher, 1998 ; Tayur et al., 1999 ; Stadler et Kilger, 2000]. Nos travaux de recherche s'appuient sur cette vision.

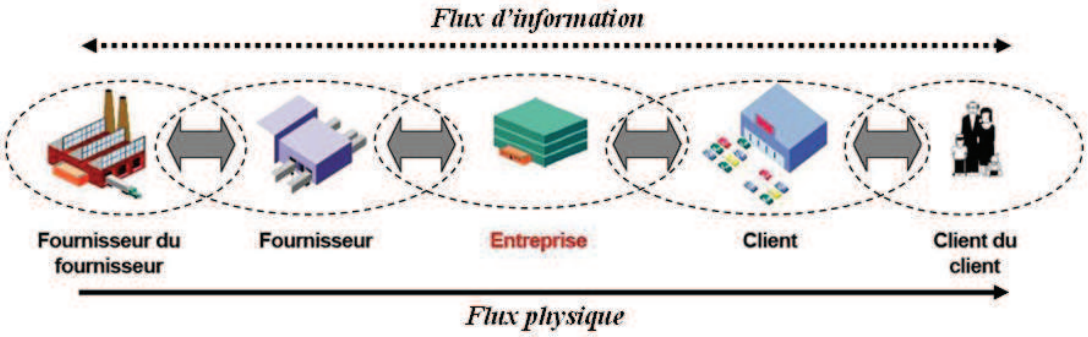


Figure I.3 *Schéma représentatif de la CL considérée comme un réseau de partenaires [Taylur et al., 1999].*

Ces différentes visions de la CL reprennent un certain nombre de concepts communs comme : flux, acteurs (éléments), produits ou services et réseau. Nous apportons dans les paragraphes qui suivent quelques éléments sur ces concepts. Le terme acteur ici peut correspondre à un fournisseur, un producteur, un distributeur, un détaillant ou un client final.

2.3 Notion de flux dans la chaîne logistique

La définition des CLs ne se limite pas à la définition des entités et du réseau les constituant. Il est, en effet, possible d'appréhender ces chaînes, à l'instar de plusieurs auteurs comme [Stadler, 2005 ; Féniès et Gourgand, 2006], par les flux les traversant. Ces flux représentent l'écoulement d'objets qu'ils soient physiques, informationnels ou financiers à travers les différents acteurs de la CL et qui établissent des interactions entre ces acteurs et leur environnement.

2.3.1 Le flux physique (de matière)

C'est l'écoulement des produits au niveau de la CL de son point d'extraction ou de stockage jusqu'à l'utilisation par le client final, afin de fournir de la valeur ajoutée. Le flux physique peut représenter un produit final, de la matière première, des composants d'assemblage, etc.

2.3.2 Le flux d'information

Il contient l'ensemble des données et décisions échangées entre les acteurs de la chaîne. C'est un flux bidirectionnel. Dans le sens de l'aval vers l'amont, il se compose au minimum des différentes commandes envoyées par chaque client à ses fournisseurs. Dans le

sens inverse, le fournisseur peut informer ses clients sur les retards de livraison, les quantités maximales qui pourront être livrées.

2.3.3 Le flux financier

Le flux financier appelé aussi flux monétaire, circule dans le sens inverse du flux physique. Il représente la valeur totale de ventes et d'achats dans une période comptable. Ce flux est échangé entre les acteurs de la CL mais il est considéré comme une résultante monétaire lors d'une fin d'activité. Il ne nécessite aucune activité de synchronisation ou de gestion comme dans le cas des deux autres types de flux.

Traditionnellement, l'enchaînement des flux est ordonné séquentiellement comme le suggère [Greis et Kasarda, 1997] (cf. figure I.4).

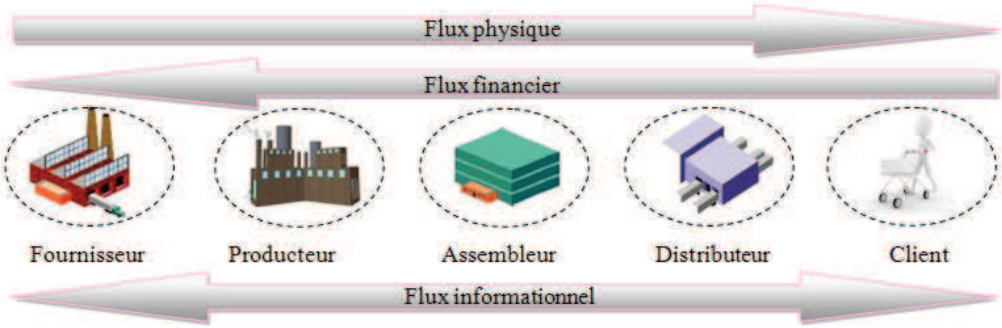


Figure I.4 *Découpage traditionnel des flux de matière et d'information dans la chaîne selon [Greis et Kasarda, 1997].*

Aujourd'hui, avec l'évolution des nouvelles technologies d'information, le flux d'information ne suit plus nécessairement la forme séquentielle, il ressemble plutôt à un échange simultané grâce à des systèmes hubs qui centralisent l'information et la rendent disponible pour tous les acteurs simultanément. En particulier, cela permet de rendre accessible l'information sur le client à des parties très en amont du réseau qui sont généralement déconnectées du client. [Greis et Kasarda, 1997] (cf. figure I.5).

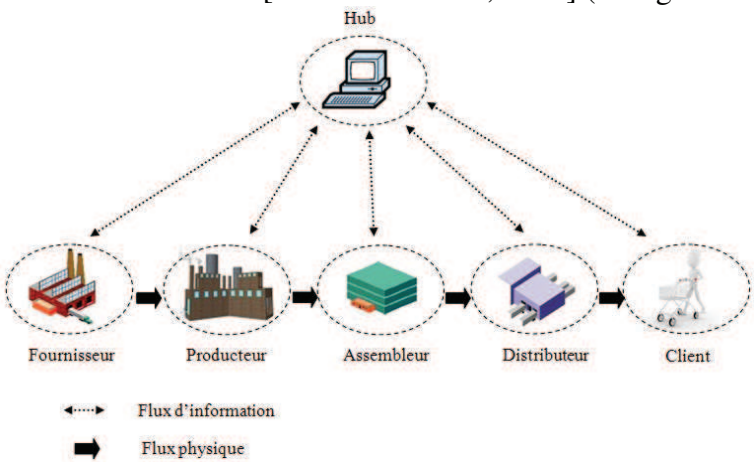


Figure I.5 *Répartition des flux dans la CL selon [Greis et Kasarda, 1997].*

Dans le cadre de nos travaux nous nous intéressons principalement aux problématiques liées aux flux physiques et flux d'informations. Nous n'aborderons pas les aspects de transfert de flux financiers entre les acteurs, toutefois nous tiendrons compte, indirectement, de ces flux en intégrant les coûts des politiques de pilotage des flux dans nos analyses.

Toute organisation qui participe à l'acheminement de ces différents types de flux, de leur point de départ jusqu'à leur destination dans les meilleures conditions, est appelée maillon ou acteur de la CL.

2.4 Les acteurs de la chaîne logistique

Les différentes définitions de la CL abordées dans le tableau I.1 donnent un aperçu sur les différents acteurs de la CL. Plus généralement, ces acteurs représentent les organisations qui participent à l'acheminement des flux de leur point de départ jusqu'à leur destination, en passant par la production, le stockage et la distribution[1] [Tounsi, 2009]. Ces acteurs peuvent être résumés comme suit :

2.4.1 Le fournisseur

Le fournisseur est l'acteur le plus amont de la CL. C'est une entité qui extraire de la matière première, fabrique, assemble les produits pour les vendre aux acheteurs, qui peuvent être des usines ou des centres de distribution [Ding, 2004]. Il est généralement la source où les flux de matières sont initiés. Ainsi, son rôle est de fournir plusieurs types de produits, qui peuvent être de différentes natures : des matières premières, des composants, des produits semi-finis et même des produits finis. L'approvisionnement de ces composants constitue de 60% à 70% des coûts des produits fabriqués [Ouzizi, 2005]. Réduire ces coûts d'approvisionnement contribue à réduire les coûts des produits finis, et ainsi à avoir plus de marges financières. Les délais de livraison des fournisseurs et la fiabilité de la distribution influent plus que le temps de production sur le niveau de stock ainsi que la qualité de service de chaque fabriquant [Harmon, 1992].

2.4.2 Le producteur

Le producteur est le cœur de la CL, il s'agit des compétences que détient l'entreprise pour fabriquer, développer ou transformer les matières premières et/ou les produits semi-finis provenant des fournisseurs, en produits semi-finis et/ou finis à destination des clients

[1] Nous reviendrons sur cette définition plus loin dans la thèse.

[Khouider, 2008]. Ici se pose la question de l'équilibre à trouver entre la capacité à la CL pour produire et la meilleure réactivité aux demandes fluctuantes du marché. Si les usines ont été construites avec une grande capacité de production, alors on peut être réactif à la demande en présence de quantités supplémentaires à faire, cet environnement a l'avantage d'être disponible pour des clients en cas de demandes urgentes ; mais d'un autre côté une partie de la capacité de production peut rester inactive ce qui engendre des coûts et dépenses en plus. D'un autre côté, si la capacité de production est limitée, la CL a du mal à être très réactive et donc peut perdre des parts du marché vu qu'elle n'est pas capable de répondre favorablement à certaines demandes [Mouloua, 2007].

2.4.3 Le distributeur

Il est rare que la livraison s'effectue, directement en une étape unique, sans rupture[2] de charge à partir des usines jusqu'aux clients finaux. En effet, cette fonction est plus généralement déléguée à des intermédiaires spécialisés dits « distributeurs », et ceci pour des raisons d'efficacité, de réduction de coût ou encore d'aptitude à offrir aux clients finaux certains services. Plusieurs éléments interviennent. Tout d'abord, l'éloignement fréquent entre les producteurs et les consommateurs nombreux et dispersés. Parallèlement à ceci, les producteurs fabriquent en quantité importante, alors que chaque consommateur n'a fréquemment besoin que d'une faible quantité. Il devient alors souvent moins coûteux d'avoir recours à des distributeurs, qui regroupent les produits de plusieurs fabricants et approvisionnent chaque consommateur pour tous ces produits. La distance et le manque de contact entre fabricants et consommateurs créent également une méconnaissance de la part du consommateur des produits et services proposés par les fabricants, ainsi qu'une méconnaissance de la part des fabricants des besoins et des désirs des consommateurs. Dans ce cas, les distributeurs servent d'intermédiaires entre les deux parties, et permettent de rapprocher l'offre et la demande [Dioux et Dupuis, 2005]. Dans ce rôle d'intermédiaires entre le producteur et le consommateur, les distributeurs revendent les produits dans le même état qu'ils les ont achetés. Ils ne les transforment pas, ou seulement de façon mineure (reconditionnement en petites quantités du produit, apposition de leur nom sur le produit…). Néanmoins, s'il n'y a pas d'acte de production proprement dit, les distributeurs ajoutent de la valeur aux produits en les mettant à la disposition des consommateurs au bon endroit, au bon moment, en bonne quantité, et ceci en leur apportant des informations nécessaires, des

[2] On appelle rupture de charge les opérations de déchargement, stockage rechargement (après un éventuel reconditionnement).

conseils, des services (installation du produit, octroi d'un crédit…) ou en mettant les produits en valeur… Pour les fabricants, les distributeurs vont également développer les ventes par des méthodes marketing appropriées.

2.4.4 Le transporteur

Le transporteur est l'acteur qui intervient tout au long de la CL, il assure le transport des matières premières, le transport des composants entre les usines, le transport des composants vers les centres d'entreposage ou vers les centres de distribution, ainsi que la livraison des produits finis aux clients.

Les problèmes liés à la distribution et au transport peuvent être vus sous plusieurs angles. On peut chercher à trouver les meilleurs modes de transports, ou bien les quantités des produits qui doivent être transportées aux clients tout en minimisant le coût global des transports et des stocks, ou bien, chercher les meilleures routes possibles pour visiter les points de collecte et/ou de distribution (véhicule routing problems, problèmes de tournées des véhicules) [Laport et al., 2002 ; Maffioli 2003]. En effet, selon les études faites par [Hugos, 2003], les coûts de transport et de distribution constituent le tiers des coûts opérationnels globaux d'une CL, ce qui rend leur optimisation un défi majeur pour les entreprises.

2.4.5 Les détaillants ou consommateurs

Les consommateurs sont les points d'absorption des flux des produits finis.

Une CL est donc le fruit des interactions de plusieurs acteurs (composants), le nombre d'acteurs impliqués définit la structure et le type de la chaîne.

2.5 Structure d'une chaîne logistique

La structuration des acteurs, qui composent une CL, constitue la typologie de cette chaîne. Dans ce contexte, cerner l'ensemble des cas réels des structures des CLs reste un travail difficile vu la grande variété des types de fabrication et des périmètres des chaînes [Galasso, 2007]. Toutefois, la littérature scientifique distingue un ensemble de typologies usuelles de chaînes, sur lesquelles sont fondées les modélisations existantes. Selon [Huang et al., 2005], on distingue cinq structures typiques de CLs (cf. figure I.6).

2.5.1 La structure en Série

Cette structure concerne un procédé de fabrication linéaire et vertical. Cette structure est souvent utilisée pour étudier l'impact de la propagation de l'information sur l'ensemble de la CL [Galasso, 2007].

2.5.2 La structure Divergente

Cette structure permet de modéliser un réseau de distribution, dans le but d'étudier la localisation des sites de distribution ou leur dimensionnement. Ce type de structure est très fréquent dans l'industrie électronique ; un exemple de configuration possible sera composé par un fournisseur de cristaux de silicium, des constructeurs de puces formant les clients de rang 1, des constructeurs de circuits électroniques pour le rang 2 et des assembleurs de téléphones mobiles en ce qui concerne le rang 3 [Gharbi, 2012].

2.5.3 La structure Convergente

Cette structure permet de représenter un processus d'assemblage afin d'étudier des problématiques diverses comme, par exemple, le choix des fournisseurs. Cette structure est présente souvent dans l'industrie automobile. Par exemple, une usine de construction de voitures aura des fournisseurs d'équipements (carrosserie, pare-brise, etc.) dans le rang 1, des fournisseurs de textiles pour le rang 2, etc.

2.5.4 La structure Dyadique

Cette structure est considérée comme un cas particulier d'une CL en série, limitée à deux étages [Kehoe et al., 2001]. Elle peut servir de base à l'étude de relations client/fournisseur ou donneur d'ordre/sous-traitant dans une CL.

2.5.5 La structure en Réseau

Cette structure est la composition d'une structure divergente et convergente permettant de modéliser des CLs plus complexes. Dans le cas de certaines CLs très étendues avec un nombre important d'entreprises, [Lambert et al., 2000 ; Min et al., 2002] adoptent une approche qui se fonde sur le classement des acteurs de la chaîne en deux catégories : les acteurs essentiels (qui contribuent à l'élaboration du produit) et les acteurs secondaires (banques, consultants, etc.). Ces auteurs préconisent alors de restreindre le réseau à étudier en se concentrant seulement sur les membres essentiels de la chaîne et en se focalisant sur certaines relations avec les fournisseurs les plus onéreux ou les plus critiques par exemple.

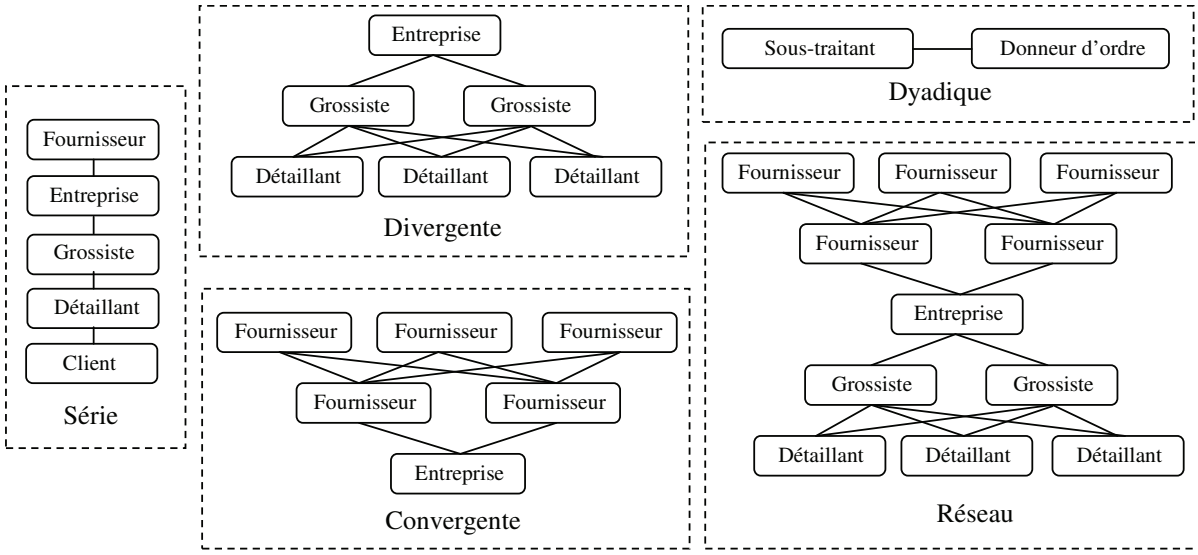


Figure I.6 *Les différentes structures typiques de la CL.*

Quelle que soit la définition ou la structure adoptée, les CLs ont toujours existé, ce qui est réellement innovant c'est le fait d'avoir une vision globale, transversale et de chercher l'optimisation dans sa globalité afin de répondre aux exigences du client final en termes de délai, de coût, de qualité de produit et de service [Müller, 2003]. Cette optimisation est possible à travers le développement du concept de « gestion de la chaîne logistique » ou « Supply Chain Management » (SCM) qui met l'accent sur la création de valeur par l'intégration des fonctions des entreprises, de l'organisation, des activités ainsi que des processus[3] [Supply Chain Council, 2000].

3. GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE

La gestion d'une chaîne logistique est définie comme étant la tâche d'intégrer les unités organisationnelles tout au long de la CL (les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs…) et de coordonner les flux de matière et d'information, de telle manière que la marchandise soit produite et distribuée au bon endroit, au bon moment et de façon à obtenir la bonne quantité. Ceci est fait dans l'objectif de minimiser les coûts et d'assurer le niveau de service requis par le client final [Stadtler et Kilger, 2000]. Le SCM comprend ainsi deux principales composantes : **l'intégration** du réseau d'installations et **la coordination** des flux de matière et d'information. Le but de cette démarche réside dans l'amélioration de la performance à long terme de chaque maillon de la CL.

[3] Un processus est défini comme étant un ensemble structuré d'activités conçues pour produire un résultat spécifique pour un client ou un marché particulier [Davenport, 1993].

De même que pour l'évolution de la notion de la CL, le concept du SCM a connu trois périodes d'évolution significatives [Masters et Pohlen, 1994] :

- *Durant la première période*, toutes les fonctions d'une entreprise sont gérées séparément. En effet chacune de ces fonctions se déroulait sans tenir compte des caractéristiques des autres fonctions logistiques ;
- *Vient ensuite l'intégration interne*, pour laquelle la gestion de toutes les fonctions d'une même installation est unifiée et devient la responsabilité d'un seul individu ;
- *Enfin l'intégration externe*, pour laquelle la gestion de toutes les fonctions et de toutes les installations de la CL est unifiée et nécessite la coopération et la coordination [Hadj-Hamou et al., 2001].

La nouveauté dans le concept du SCMs est ainsi de revoir la chaîne dans sa globalité et d'améliorer les interactions entre ses différents maillons : approvisionnement, production, transport, distribution.

Selon [Harland et al., 2001], la gestion globale de la CL est réalisée par l'intégration des fonctions et des processus définissant la CL. Cette insistance sur le fait d'intégrer toutes les fonctions de la chaîne est également justifiée, car une maîtrise de chacune des fonctions de la chaîne n'implique pas forcément une maîtrise globale de toute la chaîne. En effet, la somme des optima locaux n'est pas forcément l'optimum global et seule l'optimisation globale des performances vis-à-vis de multiples critères permet d'assurer le comportement optimal de l'ensemble.

Tout comme celui de la CL, le concept du SCM a donné lieu à plusieurs définitions dans la littérature. Nous avons choisi de les regrouper dans le tableau suivant :

Références	Définitions
[François, 2007]	Le SCM est une approche intégrative pour s'accorder sur la planification et le contrôle du flux physique entre tous les intervenants de la CL (fournisseurs, producteurs, distributeurs), depuis la matière première jusqu'au produit fini, de manière à ce que la marchandise soit produite et distribuée en quantité conforme, au bon endroit et au bon moment.
[Stadtler, 2005]	Le SCM (Supply Chain Management) est défini comme : « la démarche permettant l'intégration d'unités organisationnelles le long de la CL et la coordination des flux physiques, informationnels et financiers dans le but de satisfaire le consommateur final et d'améliorer la compétitivité de la chaîne dans son ensemble.
[Dominguez et	L'intérêt du Supply Chain Management (SCM) est de faciliter les ventes en

al., 2004]	positionnant correctement les produits en bonne quantité, au bon endroit et au moment où il y en a besoin et enfin à un coût le plus petit possible. Le principal objectif du SCM et d'allouer efficacement les ressources de production, distribution, transport et d'information, en présence d'objectifs conflictuels, dans le but d'atteindre le niveau de service demandé par les clients au plus bas prix.
[Génin, 2003]	Le SCM est une approche intégrée de gestion qui consiste à piloter dans leur ensemble les flux de matière et d'information depuis les fournisseurs jusqu'aux utilisateurs finaux, ainsi que les flux retours au moyen d'outils de planification et d'aide à la décision.
[Rota-Franz et al., 2001]	Faire du « Supply Chain Management » signifie que l'on cherche à intégrer l'ensemble des moyens internes et externes pour répondre à la demande des clients. L'objectif est d'optimiser de manière simultanée et non plus séquentielle l'ensemble des processus logistiques.
[Mentzer et al., 2001]	Le SCM peut être défini comme la coordination systémique, stratégique des fonctions opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la CL, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne.
[Simchi-Levi et al., 2000]	Le SCM est un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs, de manière à ce que la marchandise soit produite et distribuée à la bonne quantité, au bon endroit et au bon moment dans le but de minimiser les coûts et d'assurer le niveau de service requis par le client.
[Thomas et Griffin, 1996]	Le SCM est la gestion des flux de marchandises et d'informations à la fois dans et entre les sites tels que les points de vente, les centres de distribution et les usines de production et d'assemblage.
[Berry et Naim, 1994]	Le SCM a pour but d'établir des relations de confiance, d'échanger des informations sur les besoins du marché, de développer des nouveaux produits, de réduire la base des sous-traitants à un OME (original équipement manufacturer) de manière à libérer des ressources de management pour développer des relations significatives à long terme.
[Jones et Riley, 1985]	Le SCM est une approche intégrative pour s'accrocher sur la planification et le contrôle du flux physique depuis les fournisseurs jusqu'à l'utilisateur final.

Tableau I.2 *Les différentes définitions du SCM.*

L'approche SCM, a pour objectif, de pouvoir améliorer la compétitivité globale de la chaîne afin de satisfaire au mieux les besoins du client final [Stadtler, 2005]. A cette fin, le SCM fait référence aux méthodes et outils de management qui tendent à l'optimisation de l'ensemble de la chaîne. Le SCM s'appuie sur un système décisionnel hiérarchisé en niveaux, similaire à celui utilisé pour la gestion de la production à l'échelle d'une entreprise [Gharbi et al., 2012]. Ce système décisionnel fait l'objet du paragraphe suivant.

3.1 Niveaux décisionnels pour la gestion des chaînes logistiques (SCM)

Le SCM nécessite de prendre un ensemble de décisions. Ces décisions peuvent s'envisager aux trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel [Ganeshan et al., 1998 ; Shapiro, 1998 ; Huang et al., 2005]. Le classement des décisions liées au SCM est très difficile. Il n'existe pas de méthode générique qui pourrait s'appliquer à l'ensemble des secteurs industriels et de services. La première différence entre ces trois niveaux décisionnels est la portée temporelle d'application de la décision. Les décisions stratégiques sont à long terme, les décisions tactiques sont à moyen terme et les décisions opérationnelles sont à court terme et à très court terme (cf. figure I.7).

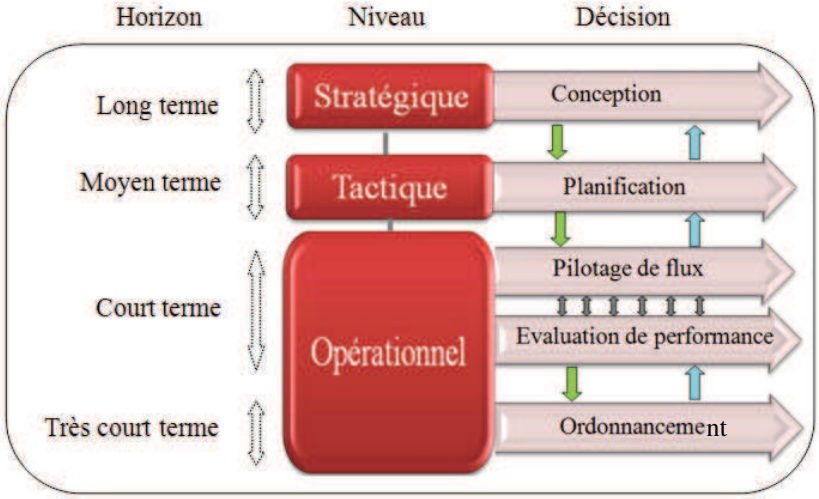


Figure I.7 *Hiérarchisation des problématiques de la CL.*

3.1.1 Les décisions stratégiques (décisions de conception)

Ce niveau regroupe toutes les décisions stratégiques de l'entreprise. Ces décisions, prises par la direction générale, sont des orientations sur le long terme (de 6 mois à plusieurs années). D'après [Ganeshan et al., 1998], les décisions stratégiques sont classées selon quatre grandes catégories de problématiques :

- *De concevoir :* détermination de la forme et de la structure de la CL. Ceci inclut la conception de la chaîne (choix des partenaires) et la localisation (choix de l'emplacement et les sites des installations) ;
- *De définir les objectifs* : la compréhension de la dynamique de la CL et la mise au point des attendus pour la chaîne entière. Ceci nécessite des analyses pour montrer comment chaque objectif induit des besoins au niveau de cette chaîne ;

- *D'identifier les avantages compétitifs* : expliquer clairement comment le SCM peut créer des avantages compétitifs au niveau de la CL, en utilisant les outils de la planification stratégique ;
- *D'évoluer la nature de stratégique du management de la CL.*

Un exemple des décisions prises à ce niveau se présente comme suit [Bel et al, 1996 ; Miller, 2001] :

- Localisation optimale des nouveaux sites (usines, entrepôts, etc.) ;
- Positionnement de nouveaux sites ou fermeture de sites ;
- Détermination de la capacité globale des sites et leurs activités ;
- Lancement de nouveaux produits ;
- Caractérisation du réseau de transport et de ces prestataires ;
- Choix des fournisseurs ;
- Etc.

3.1.2 Les décisions tactiques (décisions de planification)

Ce niveau s'intéresse aux décisions à moyen et long terme (de quelques semaines à quelques mois) qui devront être mises en application pour développer la stratégie décidée au niveau de la CL. [Tchernev, 1997] a identifié trois principales problématiques de planification :

- *La planification amont de la chaîne* : programmer l'approvisionnement en matières premières et/ou en composants et assurer leur stockage ;
- *La planification de la production :* gérer le flux de matières entre les unités de production ;
- *La planification aval de la chaîne* : programmer la livraison des produits pour satisfaire la demande client.

L'objectif majeur du niveau tactique est d'optimiser l'exploitation des capacités techniques et humaines des différents partenaires de la chaîne afin de pouvoir optimiser les actifs circulants [Génin, 2003 ; Govindan et al., 2012]. Dans ce contexte, [Shapiro, 1998] considère qu'une telle optimisation est mise en œuvre le plus souvent par la maximisation ou la minimisation d'une fonction économique (des coûts ou des profits). Des exemples de décisions caractéristiques pour la planification tactique de la CL sont [Bel et al, 1996 ; Shapiro, 1998 ; Miller, 2001] :

- Allocation des sources d'approvisionnement aux usines, centres de distribution et détaillants par région ou pays ;
- Affectation des capacités de production aux familles de produits par usine, souvent en considérant des périodes temporelles de taille moyenne (par exemple, trimestriellement) ;
- Détermination du taux d'utilisation des capacités planifiées en fabrication, par usine et au niveau du réseau ;
- Affectation des demandes aux centres de distribution ;
- Choix précis du mode de transport et des transporteurs ;
- Etc.

3.1.3 Les décisions opérationnelles (pilotage des flux, évaluation de la performance et ordonnancement)

Ce niveau de décision représente des opérations quotidiennes de courte durée (maximum deux semaines) et de très court terme (de quelques heures à quelques jours). Les décisions opérationnelles concernent des problématiques :

- *de pilotage des flux* : Il correspond à l'horizon court terme. Il s'agit des décisions de lancement des différents processus (réapprovisionnement, production, distribution, livraison,…) au niveau des différents acteurs dans la CL ;
- *de l'évaluation de performance* : l'évaluation de la pertinence et de l'efficience du pilotage s'appuiera sur des indicateurs de performance globaux ou locaux, reflétant la performance des différents processus et plus généralement la performance de la CL ;
- *de l'ordonnancement* : Il impacte souvent le très court terme. Par exemple, la gestion dynamique de l'affectation des machines, la définition de l'ordre de passage des produits sur une chaîne d'assemblage…, etc.

[Giard, 2003] a inclu les décisions de suivi en temps réel de la production. [Miller, 2001] a présenté un ensemble de décisions opérationnelles parmi lesquelles :

- Ordonnancement et pilotage en temps réel des systèmes de production ;
- Traitement et ordonnancement des commandes clients ;
- Ordonnancement et gestion des entrepôts ;
- Ordonnancement des ressources de production (main d'œuvre, machines, etc.) ;
- Ordonnancement des tournées de véhicules ou programme des livraisons qui donne les produits, la destination et les quantités à livrer ;

- Allocation des moyens de transports ;
- Ordonnancements quotidien et hebdomadaire au niveau des unités de stockage incluant la gestion des priorités.

La figure I.8 décrit les principales décisions prises aux trois niveaux selon les principaux acteurs de la CL.

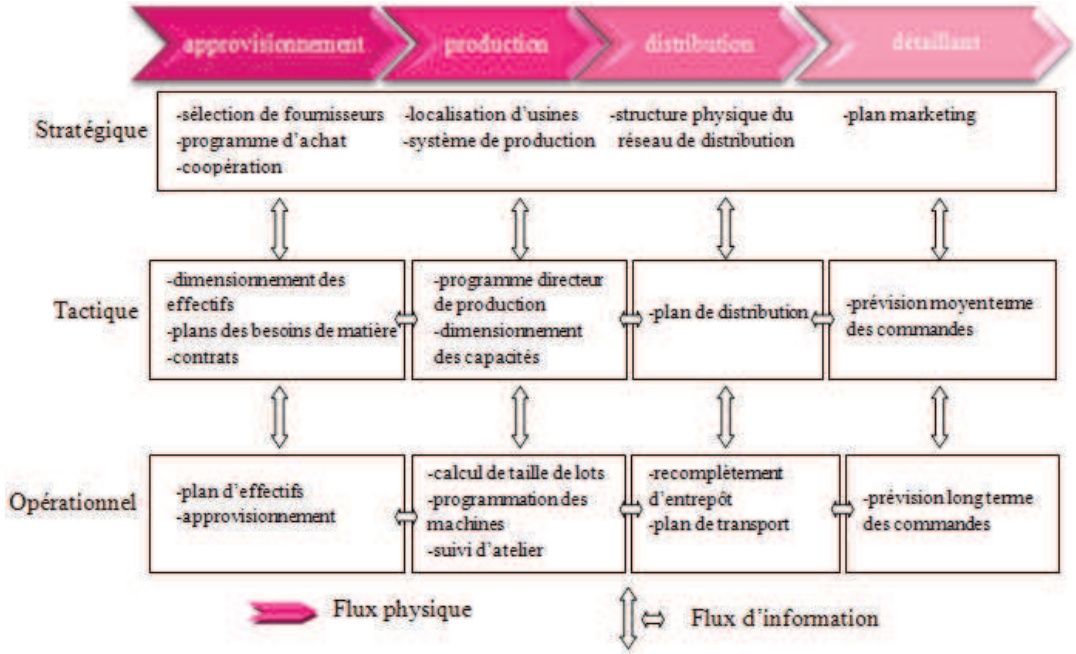


Figure I.8 *Matrice de planification de la CL [Stadtler et Kilger, 2000].*

Au regard de ces différentes décisions, notre travail de thèse s'inscrit dans le cadre du SCM. Ainsi, nous nous intéressons plus particulièrement au pilotage des flux, à l'évaluation de performances de la chaîne et à un certain niveau tactique. Les décisions de suivi en temps réel et les problématiques stratégiques de la chaîne sortent du cadre de cette thèse.

4. PILOTAGE DE FLUX DANS LA CHAINE LOGISTIQUE

Comme nous avons pu le constater auparavant, les décisions du SCMs sont classées par niveau, chaque niveau concerne son horizon de temps et il a son degré de précision des données. Les décisions opérationnelles assurent la flexibilité pour faire face aux fluctuations de la demande et des disponibilités de ressources à court et à très court terme. Ainsi, le niveau opérationnel regroupe l'ensemble de décisions de pilotage de flux à court terme telles que les décisions de lancement des ordres d'approvisionnement, de fabrication ou d'assemblage et l'ensemble de décisions d'ordonnancement à très court terme consistant à organiser la production au sein des ateliers et à gérer l'affectation des opérations sur les postes de travail. Nous nous intéressons ici à ce troisième niveau décisionnel, plus particulièrement au pilotage

de flux physiques dans les CLs. Nous aborderons son évolution à travers le temps et ses différentes décisions dans la CL ainsi que les différents types d'informations nécessaires pour prendre ces décisions. Quant aux différents types de pilotages développés dans la littérature, ils feront l'objet d'une étude bien détaillée dans le chapitre suivant.

4.1 Évolution de la notion de pilotage de flux dans la CL

La notion de pilotage de flux a connu une évolution très importante à travers le temps. Cette évolution a suivi celle de la notion de CL. Le pilotage de flux se limitait au début, à l'ensemble des règles de gestion des stocks. Par la suite, il a évolué pour intégrer plusieurs caractéristiques des systèmes de production, à savoir, les besoins de coordination des différents flux et les capacités de production limitées. Ensuite, cette notion a été étendue de plus en plus pour englober toute la CL depuis l'approvisionnement jusqu'à la distribution [Babaï et Dallery, 2004]. Dès lors, le pilotage de flux consiste aujourd'hui à prendre toutes les décisions visant, à court terme, à coordonner tous les flux, à tous les niveaux de la CL, dans l'objectif de garantir un certain niveau de service vis-à-vis du client tout en minimisant les coûts.

D'un point de vue plus pratique, piloter les flux dans la CL consiste à prendre des décisions, à chaque étape de la chaîne (depuis les fournisseurs jusqu'au client final) et pour chaque entité (matière première, composant ou produit fini), permettant de répondre aux deux questions clés suivantes : quand lancer une activité (activité d'approvisionnement, de fabrication, d'assemblage, de distribution ou de transport) et en quelle quantité ? La Figure I.9 visualise des flux physiques résultant de décisions de pilotage de flux dans une CL. Généralement, les décisions de pilotage de flux sont concrétisées par des ordres d'approvisionnement, de fabrication, d'assemblage, de distribution et de transport.

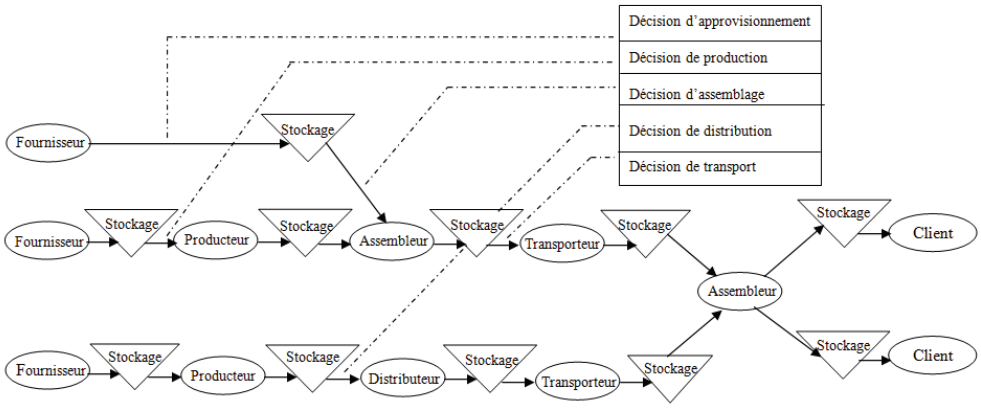


Figure I.9 *Les décisions en pilotage de flux dans une CL [Babaï et Dallery, 2004].*

Les décisions en pilotage de flux tiennent compte de plusieurs types d'informations. Ces informations peuvent être classées en quatre types :

- Les informations sur l'état du système physique de la chaîne;
- Les informations sur les politiques de pilotage ;
- Les informations sur la demande ;
- Les informations sur le transport.

Si les deux premiers types sont internes au système et peuvent être obtenus de diverses façons, les deux derniers sont externes. L'information sur la demande est un paramètre difficile à cerner qui a une grande influence sur le mode de pilotage des CLs [Babaï, 2005].

4.1.1 Les types d'information sur la demande

L'information sur la demande est généralement considérée comme un processus externe par rapport au système, ce qui veut dire que le système n'influe pas sur les demandes des clients. Cependant, la demande peut, en réalité, être influencée par l'état du système. En effet, dans le cas de ruptures de stock successives qui engendrent une insatisfaction de la demande du client, l'entreprise peut perdre le client. L'entreprise est ainsi dans l'obligation d'anticiper les besoins de ses clients et d'avoir la bonne information au bon moment pour mieux gérer son système. Par ailleurs, l'information sur les besoins du client peut être disponible sur des horizons différents et variables dans le temps. Cette information demeure incertaine pour l'entreprise et l'incertitude qu'elle comporte diminue avec la visibilité. En effet, cette information est moins fiable quand on s'éloigne dans le temps et la demande est ainsi de plus en plus incertaine. Dès lors, l'information sur la demande future peut être obtenue directement sous la forme :

- ***De commandes fermes,*** ces commandes fermes représentent une information fiable sur la demande, tant sur les quantités que sur les dates de besoin. Les commandes fermes sont définitives et ne comportent pas d'incertitude, c'est-à-dire qu'elles représentent un engagement de la part des clients.
- ***De prévisions***, ces prévisions représentent une information incertaine sur la demande. Elles peuvent provenir des commandes prévisionnelles et/ou des prévisions de la demande. *Les commandes prévisionnelles* sont des commandes émanant des clients finaux mais, contrairement aux commandes fermes, elles contiennent une incertitude sur la quantité et/ou sur la date de la demande du besoin. Quant aux *prévisions de la demande*, sont des données provenant d'études prospectives de marketing ou obtenues

à l'aide d'autres méthodes qualitatives ou quantitatives de prévision basées sur le comportement de la demande passée.

L'information sur les demandes futures, à savoir, sous forme de commandes fermes ou de prévisions, est moins fiable quand on s'éloigne dans le temps. Le pilotage de flux doit constamment réagir et s'adapter au mieux à la demande du client, quel que soit le type d'information disponible, pour atteindre et maintenir un niveau de service objectif. Ce paramètre est d'une grande importance pour le contrôle du système et, suivant son degré de fiabilité, les approches de pilotage seront différentes que se soit au niveau des planifications des activités (activité d'approvisionnement, de fabrication, d'assemblage, de distribution ou de transport)[4] au sein de chaque acteur ou au niveau des stratégies de réponse à la demande au sein de la CL globale.

4.1.2 Les stratégies de réponse à la demande

La nature de la demande passée par un client et son point de pénétration physique au niveau de la CL conditionne le type de stratégies de réponse qu'adopte cette chaîne envers la demande (cf. figure I.10). En effet, d'un côté, les délais de livraison souhaités ou acceptés par un client contraignent les temps de réponses proposés par les différents acteurs de la CL [Labarthe et al., 2007]. D'un autre côté, le point de pénétration de la demande client précise l'acteur concerné par cette demande ferme. Généralement, ces acteurs disposent de deux types de stratégies de réponse à la demande (pilotage des flux physiques) dans un cadre global de la CL : sur stock ou sur commande [Martel et Oral, 1995]. Ainsi, on distingue ces principaux types de stratégie de réponse à la demande d'une CL :

- Approvisionnement sur Commande ou STO (*Supply To Order) ;*
- Approvisionnement sur Stock ou STS (*Supply To Stock*) ;
- Production sur Commande ou MTO (*Make To Order*) ;
- Production sur Stock ou MTS (*Make To Stock*) ;
- Assemblage sur Commande ou ATO (*Assemble To Order*) ;
- Assemblage sur Stock ou ATS (*Assemble To Stock*) ;
- Livraison sur Commande ou DTO (*Deliver/Ship To Order*) ;
- Livraison sur Stock ou DTS (*Deliver/Ship To Stock*).

[4] Nous aborderons ce point dans le deuxième chapitre.

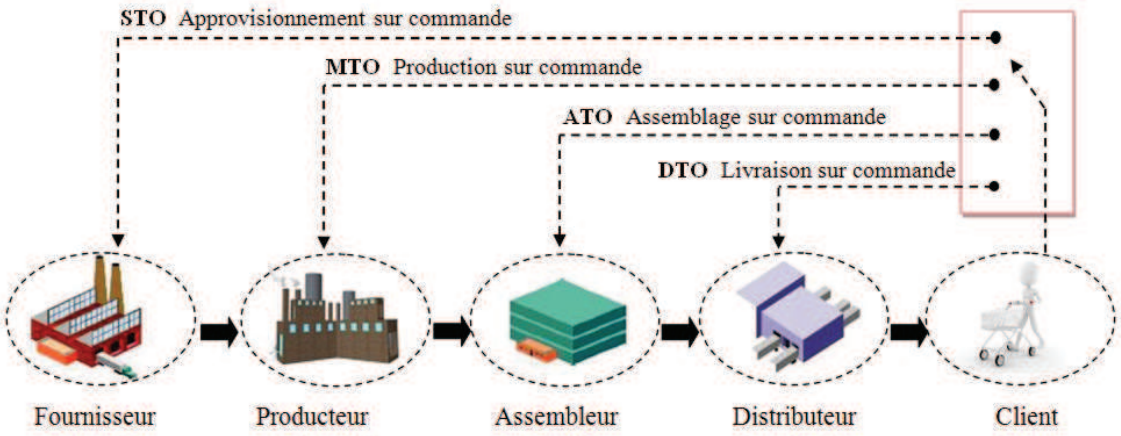


Figure I.10 *Les principaux types de stratégies de réponse à la demande selon le point de pénétration.*

Dans le cas *de pilotage du flux sur commande (STO, MTO, ATO, DTO),* le déclenchement d'un processus (approvisionnement, production, assemblage ou livraison) est dirigé par une demande ferme du client final pour répondre, sans stock inutile, aux besoins exacts exprimés par le client. Cette approche a pour avantage majeur d'éliminer les stocks de produits mais elle ne garantit pas une réactivité élevée.

Quant au *pilotage du flux sur stock (STS, MTS, ATS, DTS),* un processus (approvisionnement, production, assemblage ou livraison) est déclenché soit pour renouveler la consommation du stock soit pour satisfaire les demandes prévisionnelles des clients finaux. Ce qui conduit au stockage des produits à partir desquels les clients environnants vont être servis. L'avantage d'une telle approche est que les temps de réponse deviennent plus courts (par rapport au mode de pilotage précédent) puisque le produit est déjà disponible dans le stock. Si ce mode de pilotage des flux représente une solution intéressante au problème de réactivité, il induit en contrepartie des coûts qui peuvent s'avérer très élevés. Le coût de stock, qui, en fonction de la valeur du produit et de la quantité stockée, peut être considérable sans oublier le coût lié au risque d'invendus et à l'obsolescence.

Notons que la mission du pilotage des CLs est de satisfaire les clients par le respect des engagements en termes de qualité, coût et délai. Pour évaluer l'efficience et l'efficacité d'une stratégie de pilotage de la CL il faut mettre en place des mesures de performance. Ces mesures permettent ainsi, à travers un ensemble d'indicateurs, l'évaluation de performances des stratégies de pilotages, et par conséquent de la CL.

5. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCES

La mesure de la performance d'une CL est nécessaire pour plusieurs raisons. Les plus évidentes concernent le besoin d'évaluer la contribution de la CL à l'atteinte de ses objectifs, mais aussi la nécessité de satisfaire les exigences des clients en termes de délai, de réactivité et de fiabilité [Estampe et al., 2008].

[Jacot, 1990] analyse la démarche d'évaluation de performance en la différenciant de la simple notion de mesure « la mesure conserve un rôle important, mais s'en tient aux effets. L'évaluation est de portée plus générale : on tente de remonter aux causes et on se prononce également sur les objectifs et leur mise en œuvre ». Et plus précisément, « évaluer, c'est assigner une valeur bonne ou mauvaise, meilleure ou pire, à une entité ou à un événement. Ce n'est donc pas simplement mesurer la valeur intrinsèque des objets, c'est établir un ordre de préférence, autrement dit, certains rapports des sujets aux objets ». Une distinction fondamentale est donc à faire lors de l'appréhension de la performance, entre les notions de mesure et d'évaluation [Berrah, 1997 ; Cerutti et Gattino, 1997]. L'évaluation implique d'estimer et de comparer les actions à mener pour maîtriser la performance d'un système et permettre le choix de la solution répondant au mieux aux critères de performances de l'entreprise. Elle nécessite naturellement de mesurer les effets des actions engagées.

La mesure : la mesure est la détermination d'une grandeur par comparaison avec une grandeur constante de même espèce prise comme unité et comme référence [Larousse, 2002]. Elle fournit généralement une information locale.

L'estimation : l'estimation fournit une valeur centrale à laquelle est associée une plage de confiance dérivée d'un niveau de confiance choisi a priori par le décideur. L'utilisation d'une plage de confiance se justifie par le caractère prédictif de l'estimation (effectuée avant l'occurrence des événements à évaluer), ou par l'impossibilité d'une mesure complète (échantillonnage statistique par exemple).

L'évaluation : l'évaluation enrichit l'information donnée par une simple mesure, et délivre une interprétation par rapport à une vision globale ou cadre de référence. Ce cadre de référence est en général issu d'une analyse stratégique de l'entreprise. Il fixe et pondère les différents critères qui constituent la performance globale de l'entreprise.

En d'autres termes, la mesure de performance est un moyen indispensable à l'évaluation de performance.

5.1 Démarche d'évaluation de performance a priori et a posteriori

L'évaluation « a priori » consiste à prédire les performances d'un système futur, soit dans l'objectif de concevoir un nouveau système, soit dans celui de modifier un système existant. Il s'agit ici de « concevoir la performance », et évaluer consiste à décrire le comportement futur de l'entreprise, ou prévoir quel sera son comportement à la suite d'un changement dans les conditions existantes. L'évaluation « a posteriori », concerne un système existant et en cours d'exploitation. Il s'agit ici de « piloter par la performance ». La mesure s'effectue sur le système réel et concerne nécessairement une période déjà passée [Frein, 1998].

[Burlat et Boucher, 2003] précisent que la démarche d'évaluation de performance, qu'elle soit conduite a priori ou a posteriori, s'appuie toujours sur un modèle d'interprétation du système réel (analyse d'un modèle ou mesure directe) qui décrit les liens de causalité entre des actions sur le système et ses performances en sortie. En acceptant de faire ce lien, on entre de plain-pied dans le pilotage du système. Comme en commande classique, trois notions structurent alors l'évaluation de la performance : l'objectif, la mesure et la variable d'action [Bitton, 1990 ; Berrah, 1997]. [Berrah et al., 2000] définissent ces trois termes de la façon suivante :

- L'objectif représente l'état espéré du système piloté,
- La mesure rapporte l'état réel constaté de ce même système,
- La variable d'action constitue un levier sur lequel on peut agir en fonction de l'écart entre l'objectif et la mesure.

Le milieu socio-économique mondial actuel exige des CLs d'être capables de s'adapter et de répondre rapidement aux marchés caractérisés par des exigences telles que : minimisation des coûts, différenciation des produits, réduction des délais de production, fiabilité, réduction des délais de livraison, amélioration du contrôle de la qualité, grande flexibilité et diversité [Kaplan et Norton, 2001 ; Tahon et Frein, 2000 ; Berrah, 2002 ; Ferreira, 2010]. Ces exigences ne peuvent être effectuées avec succès que si elles sont soutenues par des performances de la CL appropriées. Pour cela, la CL est évaluée par un certain nombre d'indicateurs de performance, parfois difficiles à quantifier [Tan, 2001 ; Min et Zhou, 2002]. Ces indicateurs, choisis avec précaution, peuvent aider la direction d'une organisation non seulement à savoir où ils se trouvent par rapport à leurs objectifs, mais aussi à vérifier s'ils vont (ou pas) dans la bonne direction et à la bonne vitesse pour les atteindre.

5.2 Concept d'indicateur de performance

Pour le secteur de la logistique, les indicateurs de performance ont pour but d'évaluer l'efficacité et la viabilité des systèmes de logistique, de contrôler la mise en œuvre des politiques de logistique et d'explorer les améliorations possibles. Les différents acteurs de la CL ont différents objectifs et il faut évaluer si chacun de ces objectifs est réalisé. Donc, un indicateur de performance est un moyen de mesure de performance. Dans la littérature scientifique, plusieurs définitions de la notion d'indicateur de performance ont été donnés.

5.2.1 Définition

[Le Dain et Ndao, 1997] définissent un indicateur de performance « comme une donnée quantifiée qui n'est pas nécessairement exprimée en termes monétaires mais dans une unité qui reflète au mieux l'objectif qu'elle doit renseigner ». Le terme « donnée » ne doit pas être pris dans son sens littéral : les indicateurs de performance ne sont la plupart du temps pas donnés, il s'agit le plus souvent de les construire [Bitton, 1990].

La définition d'indicateur de performance proposée par l'Association Française de Gestion Industrielle (AFGI) [Gallois, 1990] fait l'objet d'un large consensus « un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité ou l'efficience de tout ou partie d'un processus ou d'un système, réel ou simulé, par rapport à une norme, un plan ou un objectif qui aura été déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'ensemble ». Cette définition caractérise un indicateur de performance comme un triplet constitué des trois dimensions : *objectif*, *mesure* et *variable* [Liaqat, 2012]. En se basant sur la définition de l'AFGI, [Berrah, 2002] développe cette définition en la décomposant en trois facettes distinctes:

- Une facette « objectif », permettant d'exprimer les objectifs rattachés aux indicateurs,
- Une facette « évaluation », appelée également facette capteur, qui compare les mesures atteintes par rapport aux objectifs attendus. Les performances évaluées sont exprimées de manière homogène, sur la base de certains mécanismes de calcul, facilitant ainsi une agrégation ou une évaluation ultérieure,
- Une facette « appréciation », appelée également facette observateur, qui analyse la performance atteinte en fonction du contexte de déroulement du processus ainsi que du savoir-faire de l'observateur.

Dans ce cadre, le rôle de l'indicateur de performance est aujourd'hui bien défini. Il autorise fondamentalement une boucle de retour dans le processus de décision appelée boucle

de pilotage [Bitton, 1990]. Sur la base de l'information retournée, le centre de décision enclenche ou pas une action sur la ou les variables d'action considérées. En fonction de la performance constatée, un plan d'action est enclenché sur les variables d'action dont l'effet est ensuite mesuré et une nouvelle boucle peut se dérouler (cf. figure I.11).

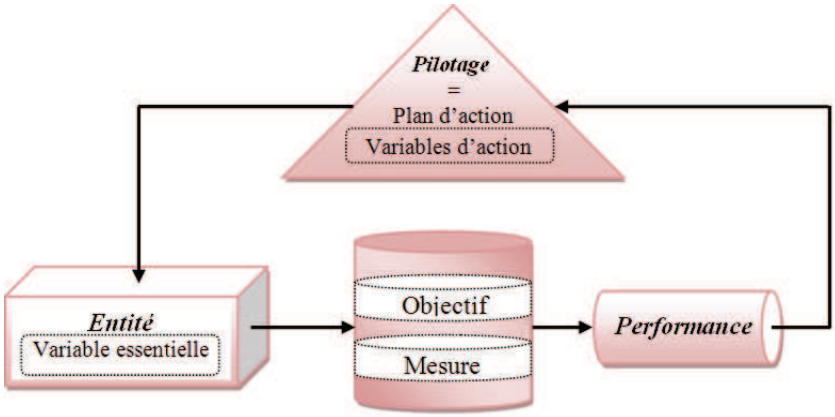


Figure I.11 *La boucle de pilotage à travers l'indicateur de performance [Clivillé, 2004].*

Dans ce sens, nous retenons la proposition de voir l'indicateur comme triplet [Bitton, 1990] qui associe trois paramètres : un objectif, une mesure et une variable essentielle [Berrah, 2002]. Cette variable (une quantité, un coût, un délai) est à observer a posteriori pour vérifier le degré d'atteinte de l'objectif assigné au système. Les expressions de l'objectif et de la mesure sont comparées pour délivrer une expression de performance. Mais pour assurer la contrôlabilité, connaître l'état du système ne suffit pas, il faut interpréter cette expression de performance et lancer, en fonction de cette interprétation, les actions nécessaires sur les variables d'action identifiées [Clivillé, 2004].

5.2.2 Classification des indicateurs de performance

Dans cette sous-section nous traitons la nature et la typologie des indicateurs de performance, ainsi nous citons les auteurs qui s'y sont intéressés. [Chan, 2003] classe ces indicateurs selon deux grandes familles : les indicateurs quantitatifs et les indicateurs qualitatifs.

5.2.2.1 Indicateurs quantitatifs

Ce sont des mesures de grandeurs physiques. Dans ce type de mesures nous trouvons des indicateurs tels que :

a. *Indicateurs liés au stockage :* Les stocks sont là pour assurer la disponibilité des produits que l'on veut vendre, et permettre un bon service au client malgré des temps de production interne longs ou peu fiables. Mais ils présentent de graves inconvénients : ils sont

à l' origine des coûts importants et, de plus, ont des effets secondaires ennuyeux : ils rendent plus compliquée la gestion, moins directe la détection des problèmes de qualité... Ils constituent vite une mauvaise habitude dont on ne peut plus se passer. La catégorie concernant cet aspect est composé par :

- ✓ *Coût de stockage* représentant les dépenses engendrées principalement pour la conservation du stock lui même [Li et al., 2006 ; Wu et Cheng, 2008 ; Ageron, et al., 2012].
- ✓ *Coût de rupture de stock* représentant le manque à gagner de l'insatisfaction des demandes clients considérés comme impatients. Généralement, le coût de rupture est le reflet de la perte de la marge bénéficiaire [Jia et al., 2007 ; Tian et Huang, 2007].
- ✓ *Coût de passation de commande* représentant le coût administratif de gestion [Chen et al., 2007 ; Zhao et Qiu, 2007].
- ✓ *Niveau de stock* [Zaojie et Guoying, 2007].
- ✓ *Niveau de rupture* [Laux et al., 2004 ; Moyaux et al., 2007].
- ✓ *Stock de sécurité* qui est indirectement lié aux coûts de rupture de stock [Weng, 1999 ; Hong-Minh et al., 2000].

Notons ici que la plupart des travaux dans la littérature analysent la combinaison de plusieurs types de coûts.

b. Indicateurs financiers : Les indicateurs financiers sont un élément très important, permettant d'évaluer les bénéfices du partage d'information [Azapagic er Perdan 2000 ; Chu et Lee, 2006]. Les plus courants sont *le revenu*, *le profit*, *le prix de vente* et *la rotation de stock.*

c. Indicateurs liés aux processus : tels que :

- ✓ *Le délai,* les clients n'attendent pas seulement un produit de qualité, avec un coût intéressant en proportion de sa valeur perçue, mais aussi un délai. Suivant les produits, les secteurs industriels et commerciaux, suivant aussi les cultures et les pays, cette dimension du délai peut prendre une part prépondérante dans le choix qu'un client fait de son fournisseur. Ce délai est composé par :

  - Le *temps de réactivité* (ou *temps de réponse*) correspond au délai entre la demande de livraison et la livraison réelle.

  - Le *temps d'écoulement* représente quant à lui le temps de traversée des produits (physiques) du point d'entrée au point de sortie d'un site. Il caractérise l'aptitude du

système industriel et logistique à servir rapidement une demande sans recours a des stocks intermédiaires.

- Le *délai de mise sur le marché* est quant à lui vital pour les produits nouveaux ou fortement évolutifs (informatique, pharmacie...) [Bernhard et al., 2005 ; Li et al., 2006].

d. Indicateurs liés au transport : correspondant aux *coûts de transport*, ils représentent généralement un poste significatif de coût logistique. Suivre un indicateur à ce sujet est important : le pourcentage des coûts de transport par rapport au chiffre d'affaire a naturellement l'intérêt de rapporter les coûts de transport en proportion du niveau de l'activité [Zhao et Xie, 2002 ; Byrne et Heavey, 2006].

5.2.2.2 Indicateurs qualitatifs

Ce sont des appréciations sur des échelles de valeurs subjectives [Stalk et al., 1990] telles que:

a. Indicateurs liés à la qualité de service : généralement la satisfaction des clients finaux d'une CL peut être mesurée au niveau de la disponibilité des produits et des services et au niveau des livraisons. La disponibilité des biens et des services est mesurable par *le taux de service* [Swaminathan et al., 1998 ; Li et al., 2006], qui s'exprime comme le rapport entre la demande satisfaite et la demande totale. Quant à la qualité de livraison, elle est mesurée sous forme *de retard* qui représente le délai de livraison renégocié [Tsung, 2000 ; Hervani et al., 2005 ; Zhu et al., 2007 ; Riopel et al., 2011 ; Chardine-Baumann, 2011 ; Ageron, et al., 2012].

b. Indicateurs liés à la flexibilité : il s'agit de la capacité de la CL à pouvoir répondre favorablement à des demandes individuelles des clients. La flexibilité peut être mesurée par le temps de cycle de développement d'un produit et les temps de réglage des machines ou outils [Gunasekaran et al., 2004 ; Vachon et Klassen 2008 ; Ageron, et al., 2012].

c. Indicateurs liés à l'effet coup de fouet : l'effet coup de fouet est l'amplification de la variation des commandes au travers la CL. La façon de calculer cet effet est de mesurer la variance des commandes reçues par chaque entité de la CL [Lee et al., 2000 ; Agrawal et al., 2007].

Comme nous venons de le voir, il existe une multitude d'indicateurs de performances de la CL. Prendre trop d'indicateurs peut engendrer un nombre important de données qu'il serait difficile à gérer et qui ne donneraient pas assez de visibilité sur ce que doivent être les

décisions qu'il faut prendre pour améliorer la qualité de la CL. En revanche, prendre peu d'indicateurs pourrait avoir des conséquences néfastes car on pourrait négliger certains facteurs importants. Le challenge ici est de prendre les bons indicateurs. Encore une fois, il n'y a pas un ensemble défini et précis d'indicateurs valables pour toutes les CLs. L'ensemble des indicateurs choisis doit dépendre de la nature des activités réalisées par la chaîne [Mouloua, 2007].

6. LA NÉCESSITE DE LA MODELISATION DES CHAINES LOGISTIQUES

Le pilotage des flux de la CL, l'évaluation de ses performances,…, ou plus généralement le SCM n'est possible qu'à travers un modèle[5] de la CL. En effet, on ne peut pas modifier directement un système pour l'améliorer dans sa globalité, compte tenu de l'état technologique et organisationnel dans lequel il se trouve et de la vision généralement microscopique que l'on peut visuellement en avoir [Ducq, 2007]. Par conséquent, avant d'envisager toute étude d'un système, il est nécessaire de construire tout d'abord son modèle. Un tel modèle permet de représenter le comportement du système, sa structure et ses processus, et ainsi prendre en compte les objectifs de ce système, ses composants et leurs interactions, ses liens avec l'environnement et son architecture. Dans notre contexte, un modèle de la CL a pour objectif de décrire : la structure de cette chaîne, ses fonctionnalités, ses relations avec l'environnement, son organisation, son évolution dans le temps, sa structure décisionnelle et sa stratégie de prise de décision [Doumeingts et al., 2000].

Un modèle de la CL est ainsi un moyen permettant d'analyser le comportement, de fonder une idée, de valider des objectifs, de communiquer avec les acteurs de la chaîne, d'évaluer la performance pour apporter un jugement ou anticiper un problème, d'argumenter une décision, de piloter l'évolution des flux de la chaîne [Chapurlat, 2007]…etc.

Bien que plusieurs modèles de la CL aient été développés dans la littérature en utilisant différentes approches, toutefois on est encore loin de trouver un modèle parfait. En effet, tous les modèles développés dans ce domaine reposent sur des hypothèses simplificatrices, et aucun des modèles existants ne peut appréhender toute la complexité de la CL. En effet, la modélisation de la CL s'avère être une tâche relativement complexe compte tenu de la forte variabilité de ses caractéristiques, notamment :

[5] Une structure conçue, capable de rendre intelligible une réalité donnée en ordonnant et en mettant l'accent sur les entités ou les relations les plus significatives, de sorte à mieux la connaître ou mieux agir sur elle » [Neubert, 1997].

- La diversité du comportement due principalement à l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de natures diverses (évolution continue, discrète, déterministe, stochastique, etc.) ;
- La diversité des échelles de la vision à considérer pour décrire les différents phénomènes observés au sein de la CL ;
- L'inhomogénéité des produits qui transitent par les différentes installations de la CL ;
- La diversité des conditions de transfert de produits liées à la structure (topologie) souvent convergente/divergente de la CL ;
- Les fortes contraintes environnementales auxquelles sont soumis les différents acteurs de la chaîne.
- Les mutations techniques rapides que connaît le secteur des nouvelles techniques de l'information et de la communication [Rascle et al., 2005] ;
- L'interaction croissante de disciplines différentes au sein d'une même application de la CL, entraînant du même coup des difficultés liées à la prise en compte des couplages pouvant exister entre ces domaines ;
- Le besoin accru en termes de méthodes et modèles à la fois simples et rigoureux, permettant de prendre en compte la CL dans sa globalité ;

Dans ce contexte, le deuxième chapitre présente les différentes démarches de modélisation de la CL. Il montre ainsi la manière dont ces approches ont appréhendé la complexité de cette modélisation.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons situé le contexte de notre étude en mettant en évidence les problèmes qu'affrontent les gestionnaires de la chaîne logistique d'aujourd'hui. En effet, nous avons présenté les fondements des paradigmes chaîne logistique et gestion de la chaîne logistique qui représentent les piliers sur lesquels reposent nos travaux de recherche. En effet, une chaîne logistique se distingue par son orientation principale. Elle peut ainsi se voir comme un ensemble d'entreprises, un ensemble d'installations ou comme un système ouvert qui fonctionne selon une logique de réseau. Toutefois, ces différentes visions reprennent un certain nombre de concepts communs comme : flux, acteurs, produits ou services et réseau. C'est dans l'objectif d'harmoniser et de coordonner ces différents concepts de telle manière à assurer une meilleure performance de la chaîne logistique globale, que le concept du « Supply Chain Management » a été développé. Ce concept assure la prise des décisions dans la chaîne

logistique sur toutes les portées temporelles. On distingue généralement trois niveaux de décision :

- Niveau stratégique qui est à long terme et regroupe toutes les décisions de conception dans la chaîne logistique. Ces décisions sont classées selon quatre grandes catégories de problématiques : concevoir, définir les objectifs, identifier les avantages compétitifs et évoluer la nature de stratégique du management de la chaîne logistique ;
- Niveau tactique qui est à moyen terme et regroupe toutes les décisions de planification dans la chaîne logistique. Ces décisions sont classées selon trois principales problématiques : planification amont de la chaîne, planification de la production et planification aval de la chaîne ;
- Niveau opérationnel qui est à court terme et à très court terme et regroupe toutes les décisions concernant les opérations quotidiennes dans la chaîne logistique. Ces décisions concernent les problématiques : de pilotage des flux, de l'évaluation de performance et de l'ordonnancement.

Le contexte général de notre étude est celui de la gestion des flux dans les chaînes logistiques. Nous nous intéressons plus particulièrement au pilotage des flux, à l'évaluation de performances de la chaîne et à un certain niveau tactique. Les décisions de suivi en temps réel et les problématiques stratégiques de la chaîne sortent du cadre de cette thèse.

La notion de pilotage de flux a connu une évolution très importante à travers le temps. Il se limitait au début, à l'ensemble des règles de gestion des stocks mais il consiste aujourd'hui à prendre des décisions au niveau de chaque acteur de la chaîne depuis les fournisseurs jusqu'aux clients finaux. Dans ce nouveau contexte, prendre une décision revient à répondre principalement à deux questions : quand et pour quelle quantité envisager un engagement d'un processus dans la chaîne logistique (tel que l'engagement d'un processus d'approvisionnement, de production, de distribution, etc.). A cet égard, prendre une décision concernant un acteur dans la chaîne logistique doit tenir compte de plusieurs types d'informations. Le plus important concerne l'information sur la demande client, qui peut être obtenue sous la forme d'une commande ferme représentant un engagement de la part du client ou sous la forme d'une prévision provenant des commandes prévisionnelles et/ou des prévisions de la demande. La nature de la demande passée par un client et son point de pénétration physique au niveau de la chaîne logistique conditionne le type de stratégie de réponse qu'adopte cette chaîne envers la demande. En effet, deux types de stratégies sont

possible : pilotage du flux sur commande (STO, MTO, ATO, DTO) et pilotage du flux sur stock (STS, MTS, ATS, DTS).

L'objectif d'une stratégie de pilotage du flux est de satisfaire les clients par le respect des engagements généralement en termes de qualité, coût et délai. Pour évaluer l'efficience et l'efficacité (la performance) d'une stratégie de pilotage du flux dans la chaîne logistique il faut mettre en place des mesures de performance. Ces mesures sont effectuées à travers des données quantifiées appelées « indicateurs ». Ces indicateurs peuvent concerner des grandeurs physiques (coût, niveau, délai, etc.) ou des appréciations sur des échelles de valeurs subjectives (taux, flexibilité, etc.).

La configuration d'une chaîne logistique, l'analyse de son comportement, le pilotage de ses flux, l'évaluation de ses performances,…, sont des tâches très complexes, celles-ci ne peuvent se résumer à l'application de quelques recettes empiriques de métier. De fait elles rendent nécessaire l'utilisation d'un modèle de la chaîne logistique. Un tel modèle permet de représenter les différents phénomènes rencontrés dans la chaîne logistique. Bien que plusieurs modèles de la chaîne logistique aient été développés, toutefois on est encore loin de trouver un modèle parfait. En effet, tous les modèles développés dans ce domaine reposent sur des hypothèses simplificatrices, et aucun des modèles existants ne peut appréhender toute la complexité de la chaîne logistique. Dans ce contexte, le deuxième chapitre présente les différentes démarches de modélisation, de pilotage et d'évaluation de performance des chaînes logistiques.

CHAPITRE II

MODELISATION ET ANALYSE DE LA CHAINE LOGISTIQUE : PRINCIPES ET DIFFICULTES

Sommaire

1. INTRODUCTION 41
2. APPROCHES DE MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE 42
   2.1 Approche d'optimisation mathématique 42
   2.2 Approche de simulation 44
      2.2.1 La simulation à événements discrets 46
      2.2.2 La simulation continue 48
         2.2.2.1 *Bond Graph* 49
         2.2.2.2 *Réseaux de Petri Continus* 49
         2.2.2.3 *Dynamique des Systèmes* 51
      2.2.3 La simulation orientée objet 53
      2.2.4 La simulation orientée Agent 56
   2.3 Approche organisationnelle 57
      2.3.1 Approche hiérarchique 57
         2.3.1.1 *L'approche cartésienne* 57
         2.3.1.2 *L'approche systémique* 58
      2.3.2 Approche hétérarchique 59
         2.3.2.1 *L'approche par processus* 60
         2.3.2.2 *L'approche holonique* 60
         2.3.2.3 *Rapproches en émergences* 60
   2.4 Approche économique 61
   2.5 Offre logicielle 62
3. MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME DE MESURE DES PERFORMANCES 64
   3.1 La méthode ECOGRAI 1990 64
   3.2 La méthode ABC – ABM 1991 65
   3.3 Le Balanced ScoreCards (BSC) 1992 66
   3.4 Le modèle SCOR 2000 67
   3.5 Synthèse de l'analyse bibliographique 68
4. LES POLITIQUES DE PILOTAGE DE FLUX 69
   4.1 Les politiques de pilotage par renouvellement de la consommation 70
      4.1.1 Politiques d'approvisionnement et de stockage 70
         4.1.1.1 *Politique à point de commande (r, Q)* 71
         4.1.1.2 *Politique à recomplètement périodique (T, S)* 71
         4.1.1.3 *Politique à point de commande, niveau de recomplètement (s, S)* 71

4.1.1.4 *Politique (T, r, S)*..... 72
4.1.1.5 *Politique (T, r, Q)*..... 72
4.1.2 Politiques de type Kanban..... 72
4.1.2.1 *Principe de la politique Kanban*..... 73
4.1.2.2 *Extensions de la politique Kanban*..... 74
a. Politique Kanban Généralisée..... 74
b. Politique Kanban Etendue..... 75
4.2 Politiques de pilotage par les besoins futurs..... 76
4.2.1 Les politiques du type planification des besoins en composants MRP..... 76
4.2.2 Politiques de gestion de stock sur prévisions..... 77
5. CONCLUSION..... 78

1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre I, disposer d'un modèle pour la chaîne logistique (CL) apporte une aide primordiale aux concepteurs, aux décideurs ainsi qu'aux utilisateurs finaux de la chaîne. Ce modèle va leur permettre, selon l'objectif visé, de :

- Décrire la structure de la chaîne logistique et son fonctionnement (obtenir une image approchée du système réel) ;
- Prévoir l'évolution de la chaîne au cours du temps et reproduire la manière dont elle va se comporter face à l'occurrence d'un événement imprévu ;
- Evaluer la performance de la chaîne ;
- Optimiser le fonctionnement de la chaîne ;
- Tester et synthétiser des stratégies de pilotage ;
- Capitaliser la connaissance de la chaîne logistique et l'appréhender sous ses différents aspects, qu'ils soient structurels, organisationnels, fonctionnels, comportementaux, informationnels et décisionnels ;
- Conduire des expériences multiples sur la chaîne logistique, sans que cela nécessite une intervention auprès de cette dernière.

Étant donné que la chaîne logistique est un système complexe à grande échelle avec un comportement dynamique, sa modélisation devient une tâche difficile. Face à une telle difficulté, des travaux très variés ont été consacrés afin d'obtenir des modèles de la chaîne logistique capables de refléter la dynamique de son fonctionnement réel. Plusieurs théories et outils ont été empruntés à des différentes disciplines, et sont adaptés pour reproduire les caractéristiques de la chaîne logistique. A cet égard, citons : la théorie de la cinétique des gaz [Armbruster et al., 2004], les réseaux de Petri [Elmahi et al., 2002 ; Desrochers et al., 2003], la logique floue [Ganga et Carpinetti, 2011], les réseaux de neurones [Xiaoni, 2006], les techniques multi-agents [Dodd et Kumara, 2001 ; Forget et al., 2008], la dynamique du système [Petrovic, 2001], etc.

Cela a abouti à un large éventail de modèles décrivant les différents aspects de la chaîne logistique. Certains de ces modèles recherchent la simplicité et d'autres la précision. Certains prennent en compte le caractère hétérogène du flux de produits (multi-produits), d'autres l'ignorent, etc. Face à une telle diversité, ces modèles ont été classés de plusieurs

manières (le lecteur pourra se référer à [Harrel et Tumay, 1994 ; Beamon, 1998 ; Min et Zhou, 2002] pour plus de détails). Toutefois, une attention particulière est portée à la classification, fondée en fonction des propriétés des modèles. En nous inspirant du classement proposé par [Labarthe, 2006], nous pouvons distinguer cinq grandes approches des modèles de la chaîne logistique : approche d'optimisation mathématique, approche de simulation, approche organisationnelle, approche économique et offre logiciel.

Dans ce chapitre, nous passerons tout d'abord en revue ces différentes approches des modèles de la chaîne logistique afin de montrer comment elles appréhendent la complexité de la chaîne tout en expliquant pour chacune son principe général et ses principales caractéristiques. Nous détaillerons davantage l'une d'entre elles : l'approche que nous adoptons dans nos travaux pour développer un modèle de la chaîne logistique.

Ensuite, après avoir défini les concepts relatifs aux mesures de performances de la chaîne logistique, nous donnerons un aperçu sur les différents modèles de références existants dans la littérature permettant l'évaluation de la performance de la chaîne logistique. Notre objectif est de souligner les principaux éléments sur lesquels s'appuie un système d'évaluation de la performance en identifiant notamment les indicateurs à partir desquels la mesure de performance est réalisée.

Enfin, nous aborderons les principales politiques de pilotage de flux dans la chaîne logistique issues de la littérature. Nous y décrirons le principe de fonctionnement, les contextes et les conditions de mise en œuvre de chaque politique et nous donnerons un aperçu sur les similarités et les différences qui existent entre elles.

2. APPROCHES DE MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE

La modélisation de la CL est une étape cruciale dans la mesure où elle constitue le premier pas pour la gestion de la chaîne logistique (SCM). Après avoir abordé, dans le premier chapitre, le concept du SCM, il s'agit, dans ce chapitre, de la phase de modélisation. Nous passerons en revue ici les différentes approches des modèles de la CL citées en dessus.

2.1 Approche d'optimisation mathématique

Les approches d'optimisation mathématique sont utilisées pour trouver une solution qui optimise une fonction objectif. Le problème est souvent formalisé sous forme d'un ensemble de contraintes à respecter. Une telle formalisation implique :

- la mise en évidence des variables décisionnelles traduisant les possibilités de contrôle du système étudié ;

- le choix des attributs des entités qui constituent les variables d'état du système ;
- l'explicitation des relations qui lient les variables de décisions aux variables d'état (ex. des équations d'état du système qui décrivent l'évolution dynamique de l'état du système en fonction du contrôle) ;
- la formulation des contraintes du système issues des caractéristiques statiques (ex. la limitation des capacités des machines, etc.) ;
- la définition du critère à optimiser (maximiser ou minimiser). Ce critère est une fonction qui dépend des décisions prises.

Le but de ce type de modélisation est d'obtenir, par le calcul, les décisions à prendre pour optimiser le critère choisi tout en satisfaisant l'ensemble des contraintes imposées. Un modèle d'optimisation mathématique peut être formulé en utilisant la programmation linéaire, linéaires avec variables entières, linéaires mixtes, quadratiques, non linéaires,…, etc. Les problèmes concernés par ce type de modélisation sont souvent abordés en deux étapes :

- *Étape de modélisation* : elle consiste à formaliser le problème étudié en un modèle d'optimisation.
- *Étape de résolution* : elle consiste à résoudre le modèle proposé en utilisant des méthodes exactes, des heuristiques[1] [Zhou et al., 2008] ou des métaheuristiques[2].

Parmi les nombreux travaux réalisés avec ces approches, on peut citer,

- [Altiparmak et al., 2006] proposent un modèle d'optimisation multicritère de la CL en utilisant les algorithmes génétiques.
- [Amiri, 2006] désigne un modèle d'optimisation en utilisant la relaxation lagrangienne, avec prise en compte des capacités des dépôts de stockage et des ressources de production comme variables de décisions.
- [Kim et al., 2002] présentent un modèle de sélection de fournisseurs en utilisant la programmation dynamique sous une demande stochastique.
- [Camm et al., 1997] recommandent un modèle d'optimisation à variables entières et réelles couplé avec un système d'information géographique pour résoudre un problème de configuration de la CL de Procter et Gamble.

[1] [Newell et al., 1957] précisent qu'un processus heuristique peut résoudre un problème donné, mais n'offre pas la garantie de le faire.
[2] [Osman et Laporte, 1996] définissent la métaheuristique comme un processus itératif qui subordonne et qui guide une heuristique, en combinant intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l'espace de recherche.

- [Cohen et Lee, 1989] développent un modèle de programmation linéaire pour la maximisation du profil global d'une chaîne d'assemblage d'ordinateurs.
- [Lakhal et al, 2001] proposent un modèle d'optimisation stratégique qui porte sur la maximisation de la valeur ajoutée des activités.
- [Shib, 2013] a fourni une méthode d'optimisation pour déterminer les paramètres optimaux de contrat du canal d'un fabriquant et un détaillent.

[Thomas et Griffin, 1996] distinguent les modèles analytiques suivant deux niveaux hiérarchiques : opérationnel et stratégique. Au niveau opérationnel, la plupart des problèmes soulevés sont la gestion des ressources avec files d'attentes, la gestion du transport, l'utilisation ou non de la sous-traitance, la gestion de la production locale ou globale, la détermination de la taille des lots pour la production et la distribution, le choix du type de transport. Au niveau stratégique, les décisions à prendre sont l'ouverture ou la délocalisation d'une entreprise ou d'un centre de distribution, l'allocation d'équipements pour les entreprises, le choix de sites pour l'implantation de nouvelles entreprises pour un nouveau produit ou pour le changement du flux physique d'un produit à travers la chaîne, le choix de fournisseurs.

Les principales limites de ces approches d'optimisation résident dans :

- Leur impuissance à considérer plusieurs critères qualitatifs ou subjectifs. Cet inconvénient est très important quand il s'agit de décisions stratégiques [Akbari Jokar, 2001] ;
- Leur impuissance à prendre en compte la réalité temporelle des processus ainsi que les interactions entre entités ;
- Leur impuissance à expliciter le comportement des entités, notamment leur caractère réactif, autonome et proactif ;
- Leur restriction sur certaines hypothèses ;
- Leur temps d'obtention des résultats exacts, qui augmente exponentiellement avec la taille du problème. Ce qui fait que, souvent les industriels préfèrent utiliser des solutions approchées obtenues dans des délais raisonnables [Mouloua et Oulamara, 2007].

2.2 Approche de simulation

Les modèles de ces approches se sont attachées à décrire les différents composants de la CL et à reproduire leur comportement et la manière dont ils interagissent. Cette description

permet ainsi d'expliquer et de prévoir le comportement global de la chaîne. Ces approches permettent de construire un modèle de la CL et ainsi de conduire des expériences sur ce modèle afin de comprendre le comportement de ce système et d'en améliorer la performance en se fondant sur un certain nombre de critères [Castagna, 2004].

Par conséquent, la simulation n'est pas limitée à reproduire le fonctionnement d'une CL, mais à montrer qu'une chaîne modélisée peut bien être utilisée comme prototype d'étude de certaines problématiques communes à d'autres chaînes [Kim et al., 2004].

Dans ce contexte, un modèle de simulation d'une CL devrait intégrer les processus logistiques représentant les différentes activités reliées par des flux de matière, de flux d'information et de flux financier [Banks et Buckley, 2002].

L'apport de ces approches de simulation dans la description de la CL réside dans :

- Leur capacité de modélisation des processus de façon plus explicite et formalisée que les modèles d'optimisation mathématique ;
- Leur prise en compte des variables stochastiques, et leur évolution dans le temps [Thierry et al., 2008].
- Leur prise en compte de l'aspect dynamique de la CL qui est un système très complexe à grande échelle avec un comportement dynamique [Anderson et Morrice, 1999] ;
- Leur pouvoir d'exploration des procédures et des modes de gestion ce qui est d'un grand intérêt pour les gestionnaires [Banks, 1998] ;
- Leur force dans l'évaluation des variations de la CL et de l'interdépendance de ses composants. Cela permet à un décideur d'évaluer les changements dans une partie de la CL et de visualiser l'impact de ces changements sur les autres parties de la chaîne, et par conséquent d'avoir une idée précise sur la performance de l'ensemble de la chaîne [Wyland et al., 2000 ; Terzi et Cavalieri, 2004] ;
- Leur aptitude à étudier la CL dans sa globalité, au lieu de séparer les différents acteurs (comme dans la plupart des modèles d'optimisation), [Wyland et al., 2000]. En allant plus loin, d'autres auteurs considèrent que le comportement global d'une CL ne peut être évaluée qu'en utilisant la simulation [Riddalls et al., 2002].
- Leur capacité à capturer les incertitudes et à traiter l'aspect stochastique prenant en compte des paramètres aléatoires et inconnus.

[Bel, 2008] décrit la modélisation par simulation (méthodes évaluatives) et distingue la simulation par avance de temps et la simulation par prochain événement (événements discrets). Il note également que les approches par simulation et les approches d'optimisation peuvent être complémentaires. En effet, les approches par simulation donnent un ensemble de solutions (performance prévue) du système que l'on pourra par la suite intégrer dans un modèle d'optimisation (objectifs et contraintes) qui va permettre d'atteindre la solution optimale. L'article de [Ebadian et al., 2012], présente une combinaison des approches par simulation/optimisation pour évaluer l'impact des systèmes de stockage sur les coûts supportés par chaque acteur dans une chaîne d'approvisionnement en biomasse agricole.

Dans la littérature, les travaux de recherche dans le domaine de la modélisation par simulation utilisent le plus souvent les approches suivantes :

- La simulation à événements discrets (SED) ;
- La simulation continue ;
- La simulation orientée objet ;
- La simulation orientée Agent ;

2.2.1 La simulation à événements discrets

La majorité des travaux de simulation des CLs reposent sur des modèles à événements discrets. Le développement de cette technique n'a cessé de progresser et reste parmi les meilleurs outils d'étude des CLs [Robinson, 2005]. Dans ce type de simulation, les variables d'état que l'on désire connaître à tout instant sont discrètes et changent aux instants d'occurrences des événements[3]. L'ensemble des valeurs que ces variables peuvent prendre constitue l'espace d'état du système dans lequel chaque changement d'état ou événement se produit à des dates d'événement.

Un grand nombre d'outils de modélisation par simulation à événements discrets utilisent une approche par processus[4] [Essaïd, 2008]. Cela permet de présenter des séquences d'événements ou des activités similaires pour un type de produit, défini sous forme de processus. Cette approche permet de décrire le fonctionnement du système complet (macro-représentations) et de définir les conflits et la synchronisation entre processus qui sont gérés par des règles d'interruption et de reprise.

[3] Un événement étant défini comme une occurrence instantanée qui peut faire changer l'état d'un système.
[4] Un processus est défini comme étant un ensemble structuré d'activités conçues pour produire un résultat spécifique pour un client ou un marché particulier [Davenport, 1993].

La simulation à événements discrets est beaucoup utilisée pour explorer le potentiel d'amélioration des CLs (reconfiguration, réduction des temps de cycle, amélioration du rendement, etc.). Contrairement à la simulation d'un atelier, à l'échelle de la CL, les petites améliorations que l'on peut proposer grâce à la simulation peuvent être d'un grand bénéfice pour l'ensemble des acteurs [Essaïd, 2008]. Ces méthodes de modélisation sont très appropriées pour des systèmes caractérisés par une grande variabilité et des aléas, des relations complexes entre partenaires, et un besoin d'optimisation des ressources en les adaptant à la demande du marché.

Dans la littérature, plusieurs travaux utilisant les différentes extensions de réseaux de Petri discrets (RdPD)[5] ont été appliqués dans le domaine de la CL. [Viswanadham et Srinivasa, 2000] proposent une approche de modélisation et d'analyse de la performances d'une CL à base des réseaux de Petri stochastiques généralisés. La CL étudiée, considérée comme un système discret, est composée de deux fournisseurs qui produisent chacun un type de produit, deux transporteurs amont associés à chacun des fournisseurs, un système d'assemblage des deux types de produits, une logistique aval (processus de livraison) associée au système de production et deux entrepôts de stockage. Le système est modélisé par un réseau de Petri stochastique généralisé (RdPSG). Le modèle a permis de comparer la performance de deux types de politiques de production « fabriquer pour stocker » et « assembler sur commande », ceci, en terme de coût lié à la rupture de stock et des retards de livraison. Les auteurs considèrent en particulier le problème de la localisation du point de découplage[6] de la CL comme un problème de minimisation du coût. Ce problème est résolu en utilisant les réseaux de files d'attente. [Van der Vost, 2000] étudie un cas réel d'une CL agroalimentaire à l'aide de la simulation du modèle RdP qui représente ce système. Une étude similaire d'une CL agroalimentaire a été menée par [Bhushan et Gummaraju, 2002] à l'aide d'un réseau de Petri stochastique généralisé. Une analyse analytique de paramètres d'un système logistique composé d'un fournisseur et de plusieurs vendeurs de deux types de produits est présentée par [Nakashima et Gupta, 2003]. Le système est modélisé par un GSPN. [Arns et al., 2002] proposent une approche similaire à celle présentée par [Srinivasa et Viswanadham, 2001] pour la modélisation et l'évaluation des CLs. Elle est basée sur les GSPNs et les réseaux de files d'attente. Le travail de thèse de [Labadi, 2005] s'intéresse à la modélisation et à l'analyse de performances des CLs et des systèmes de gestion de stocks à

[5] Nous reviendrons sur la définition de cet outil dans le troisième chapitre.

[6] La frontière entre le pilotage des flux en mode tiré et en mode poussé est matérialisée par un stock de produits dont la localisation est appelée le point de découplage [Christopher et Towill, 2000].

l'aide des RdP. Dans ce contexte, un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques dits réseaux de Petri lots déterministes et stochastiques RdPLDSs a été développé, capable de supporter les caractéristiques essentielles de cette classe de systèmes.

Pour que la simulation soit possible, il faut être capable de décrire les changements d'état par des algorithmes, et de définir pour chaque événement des contraintes de précédence entre les activités. Ce principe est simple mais la quantité de données à traiter et à stocker lorsque la densité des produits est élevée, fait qu'il requiert d'importantes ressources en termes de temps d'exécution et d'espace de stockage. Dans ce cas, le nombre d'états accessibles est important, ce qui constitue une des principales limitations à l'utilisation de cette simulation à événements discrets. C'est pour éviter l'explosion combinatoire du nombre d'états accessibles que la simulation continue a été introduite dans la littérature.

2.2.2 La simulation continue

La simulation continue concerne la modélisation d'un système évoluant au cours du temps, représenté par des variables d'état qui évoluent continûment dans le temps. Les modèles de simulation continue reposent généralement sur des équations différentielles qui régissent les relations entre les variations des variables d'état. Dans le cas où ces équations différentielles sont particulièrement simples, elles peuvent être résolues analytiquement. Dans le cas contraire (la grande majorité des cas), sont utilisées des techniques numériques telles que l'intégration de type Runge-kutta [Law et Kelton, 1991].

La simulation continue peut traduire facilement le fonctionnement continu d'industries de process (chimie par exemple). Par exemple, [Dégrés et al., 2005] l'ont utilisé pour simuler un système de production métallurgique. [Pierreval, 2006] souligne l'intérêt d'une simulation combinée continue-discrète, appelée aussi hybride, pour l'aide au pilotage d'une fonderie lourde. La simulation continue est aussi utilisée selon la dimension spatiale et temporelle du système simulé. [Caux, 2006] développe une procédure d'agrégation des flux pour la simulation continue de réseaux de sites industriels, alors que [Pierreval et al., 2007] déclinent une démarche de simulation continue sur une CL dans l'industrie de l'automobile.

Parmi les outils permettant la mise en œuvre de cette approche de simulation continue, nous citons les Bond Graphs [Dauphin-Tanguy, 2003], les réseaux de Petri Continus [Alla et David, 1998] ou encore la dynamique des systèmes [Forrester, 1961].

2.2.2.1 Bond Graph

L'approche Bond Graph (BG) ou graphe de liaisons est une technique de modélisation pour représenter graphiquement, le comportement dynamique des systèmes étudiés. Elle utilise un langage unique, applicable à tous les domaines de la physique facilitant ainsi considérablement l'étude des systèmes composés et hétérogènes. Si cette approche était initialement conçue pour la modélisation des systèmes technologiques (électrique, mécanique, pneumatique, hydraulique, thermique…) où elle a fait ses preuves [Dauphin-Tanguy, 2003], quelques travaux de recherche ont appliqué cette approche dans les domaines non-technologiques tels que les sciences sociales et économiques [Brewer, 1991]. Récemment des efforts ont été faits pour étendre cette approche dans le domaine des systèmes de productions [Dembélé et Lhote,1995 ; Bensedik, 1996 ; Besombes et al., 1997 ; Lair et al., 1998 ; Ferney, 2000 ; Benmansour et al., 2004], dans le domaine du trafic routier [Lozano et al., 2005 ; Iordanova, 2006 ; Benmansour et al., 2006 ; Abouaissa et Join, 2008] et dans le domaine de la CL [Benmansour et al., 2011]. Ce dernier a développé un modèle de trafic routier à la fois simple et rigoureux qui s'étend à un large réseau routier et qui s'adapte facilement au niveau d'analyse visé. Ce modèle permet de décrire le comportement dynamique global de la circulation de véhicules au sein d'un réseau de trafic tout en tenant compte de la spécificité au niveau des intersections. De plus, il permet de se focaliser sur le comportement individuel des véhicules au niveau de certains endroits du réseau requérant une certaine précision. A la différence des modèles du trafic existants, ce modèle Bond Graph développé, utilisant un langage graphique unifié, permet de reproduire facilement les caractéristiques de la circulation des véhicules sur un large réseau et de simplifier fortement les techniques d'analyse. Afin d'élargir ce modèle Bond Graph du trafic à l'étude du comportement dynamique du flux physique au sein d'une CL, une transposition des concepts développés sur le trafic vers la CL a été réalisée. Ainsi, un modèle Bond Graph de la CL a été développé et permettra de contribuer au redéploiement et à la synchronisation de l'ensemble des activités de la CL, de l'approvisionnement à la distribution.

2.2.2.2 Réseaux de Petri Continus

Les Réseaux de Petri (RdPs) constituent, depuis leur introduction en 1962 par Carl Adam Petri [Petri, 1962], un puissant outil de représentation graphique et mathématique des systèmes à événements discrets [Silva et Teruel, 1997]. Un large éventail d'extensions du modèle RdP ont été développés, grâce à leur capacité de modélisation, et ils ont été appliqués à des domaines divers [David et Alla, 1992]. Dans ce contexte, le RdP Continu (RdPC)

[David et Alla, 1987] permet l'analyse de la performance en terme de flux (débit) et il est très utile lorsque la taille du système est assez grande afin d'éviter le problème d'explosion combinatoire du nombre d'états. Nous détaillerons davantage, dans le chapitre suivant, cet outil que nous appliquons pour développer notre modèle de la CL.

Bien que le domaine de la CL pourrait tirer un grand bénéfice de RdPC, très peu de travaux [Smata et al., 2010, 2011a, 2011b , 2011c, 2012 ; Smata 2011], à notre connaissance, ont été menés dans ce domaine. En effet, jusqu'à maintenant, le champ principal de son application est essentiellement pour les systèmes de productions et de transport.

[Amer-Yahia et al., 1995] utilisent les réseaux de Petri Continue à vitesse Variable (RdPCV) afin de déterminer des propriétés particulières des systèmes de production, la stabilité en particulier. Ils s'intéressent plus particulièrement à une classe de RdPCV : celle dans laquelle chaque transition du réseau ne possède qu'une seule place en entrée (SIP-VCPN : Single Input Place- Variable speed Continuous Petri Nets). Selon les auteurs, un système est dit stable si le niveau de chaque place reste borné au cours du temps. Ils présentent plusieurs théorèmes qui permettent de déterminer, selon la forme des matrices définissant le comportement du système, si celui-ci est stable ou non. Les auteurs appliquent leurs recherches à deux exemples théoriques : une ligne de production ouverte et une autre fermée. Dans ces exemples, les places représentent les stocks intermédiaires, les transitions représentent les machines et les jetons représentent les palettes de manutention.

Ces travaux sont complétés par [Amrah, 1998] qui a étudié également les systèmes à événement discrets modélisés par les RdPCV. Ces travaux portent sur l'analyse et la commande des systèmes de production. L'auteur définit l'analyse comme la mise en évidence des propriétés qui renseignent sur des comportements ultérieurs des systèmes. L'auteur s'intéresse à deux propriétés particulières : la stabilité (déjà étudiée partiellement par [Amer-Yahia et al., 1995]) et l'accessibilité qui consiste à savoir a priori s'il existe un profil de cadences maximales de production des machines tel qu'un niveau moyen désiré des stocks est réalisable. L'auteur a étudié ces deux propriétés pour différentes configurations de lignes de fabrication (ouvertes et fermées). Il a généré son étude pour le cas des lignes d'assemblage.

[Amrah, 1998] a également étudié le problème consistant en fait à amener le niveau moyen des stocks à une valeur souhaitée par une action extérieure sur les durées opératoires des machines tout en cherchant à maximiser le taux de production en sortie [Amrah et al., 1998].

D'autre part, de nombreux résultats ont été établis avec les RdPCV pour la commande des systèmes de production [Ghabri, 1995 ; Amrah et al., 1996 ; Hanzalek, 2003 ; Silva et Recalde, 2003 ; Lefebvre et al., 2004]. De par la portée des résultats obtenus, cette approche apparaît comme une alternative intéressante à la commande discrète des systèmes à événements discrets [Lefebvre et Thomas, 2002].

[Tolba et al., 2005] ont développé un modèle de trafic macroscopique basé sur le potentiel des RdPCV dans lesquels les caractéristiques globales du trafic (débit, densité, vitesse) sont réinterprétées par les paramètres des RdPCV. Chaque segment routier est représenté par un RdPCV dans lequel l'évolution des franchissements des transitions représente les débits moyens. Cette évolution permet de calculer le nombre de véhicules sur le segment conformément à l'équation d'évolution fondamentale du RdPCV. Cette approche de modélisation a été élargie à l'étude de la circulation dans les carrefours à feux dont le modèle RdPCV du segment a été adapté aux outils de commande existants.

L'extension de RdPC a conduit à une autre extension dite RdP Hybrides « RdPH » [Le Bail et al., 1991]. Un RdPH est une combinaison de la sémantique d'un RdPC et celle d'un RdP ordinaire (discret). La représentation d'un système à comportement hétérogène, par un RdPH, est décrite par deux parties différentes :

- Une partie continue dont le comportement est décrit par un RdP continu ;
- Une partie discrète modélisée par un RdP temporisé (à temporisation déterministe ou stochastique).

Dans ce contexte, [Dotoli et al., 2009] propose un modèle hybride modulaire pour la gestion et le contrôle de la CL au niveau opérationnel. Ce modèle permet de décrire conjointement avec le flux physique, le flux financier et celui d'information dans la chaîne logistique en se basant sur un RdPH de premier ordre[7]. En particulier, le modèle proposé permet de décrire le comportement de la CL et de formaliser le système de contrôle en proposant différentes stratégies de commande en boucles fermées capables d'optimiser certains indices de performance souhaités.

2.2.2.3 Dynamique des Systèmes

Cet outil a été utilisé dans nombreux domaines : marketing, écologie, médecine, industrie, psychologie, économie, etc. L'un des principes fondamentaux de la Dynamique des

[7] Cette extension de RdPH de premier ordre a été développée par Balduzzi [Balduzzi, 2000], elle utilise l'approximation fluide première ordre.

Systèmes est la notion de feedback (ou boucle de rétroaction) sur laquelle repose toute organisation dynamique. Le principal objectif de la Dynamique des Systèmes consiste à étudier le comportement des systèmes pour lesquels on peut mettre en évidence l'existence de relations causales [Thiel, 1998]. Dans cette perspective, l'un des fondements de cette approche est l'idée que les organisations sont plus justement décrites si l'on s'intéresse aux flux qui les régulent, plutôt qu'aux éléments qui les composent. La modélisation de l'interaction entre les différents éléments du système réel s'effectue par des équations aux différences finies qui sont une approximation du cas continu [Thiel, 1998].

Parmi les applications de cet outil dans le domaine de la chaîne nous pouvons citer notamment ceux de [Higuchi et Troutt, 2004], qui utilisent la dynamique des systèmes pour modéliser la CL d'un fabricant de jouets. [Spengler et Schröter, 2003] utilisent également cette approche pour étudier une chaîne d'approvisionnement de pièces de rechange. [Barlas et Aksogan, 1996] qui s'intéressent à la CL de l'industrie textile. Leur modèle, qui inclut les détaillants et les grossistes, s'intéresse en particulier à l'influence de la diversité sur l'achat des consommateurs. La première répercussion d'une augmentation de la diversité des produits est que les consommateurs ont plus de chance de trouver un modèle à leur goût (effet positif sur les ventes). Mais la deuxième répercussion est une diminution des stocks de chaque produit et donc un risque accru de ruptures d'approvisionnements (effet négatif sur les ventes). L'objectif du modèle est justement de déterminer le niveau de diversité qui donne suffisamment de choix aux clients tout en évitant les ruptures d'approvisionnement afin de maximiser les ventes globales. [König, 1997] propose quant à lui un modèle d'une CL incluant des clients, des fournisseurs de rang 1 (en relation juste à temps avec les clients) et des fournisseurs de rang 2 (en relation avec les fournisseurs de rang 1). Chaque fournisseur est représenté par un stock de matières premières, une activité de production et un stock de produits finis. Les différents paramètres du modèle sont la capacité des machines, la main d'œuvre disponible et le délai de production. Les simulations réalisées permettent également de tester diverses stratégies du SCM telles que la mise en place d'un stock central ou la décentralisation de ce stock au sein des différents fournisseurs. [Bruniaux, 1999] a appliqué la Dynamique des Systèmes pour développer un modèle composé des trois activités classiques de la CL : réapprovisionnement, fabrication et distribution. Le modèle a été appliqué sur un réseau réel constitué de six sites industriels issus du secteur automobile. Grâce à ce modèle les pénuries de composants et les goulots de production ont pu être identifiés. De plus, le modèle a permis d'évaluer les différentes actions possibles pour les résorber.

Diverses études ont été menées pour comparer la simulation à événements discrets et la simulation continue d'un même système. [Durand, 1993] par exemple, a simulé le comportement d'une ligne de montage de véhicules automobiles par les deux types de simulation, discrète et continue. Une autre étude comparative a été menée par [Crespo Marquez et al., 1993], elle consistait à comparer la simulation à événements discrets et la simulation continue pour la modélisation d'un système Kanban dans un contexte juste à temps. Un complément à cette étude, portant sur la modélisation d'un système CONWIP (CONstant Work In Process), a été apporté par [Ruiz Usano et al., 1996]. [Durand, 1993 ; Rault, 1993] ont cherché, dans un premier temps, à construire un modèle de simulation à événements discrets d'un atelier d'automobiles complet. Ce modèle discret très détaillé où le comportement de chaque véhicule était géré, n'a jamais pu être utilisé. En effet, il était trop gourmand en temps de calcul. Cette expérience a incité les auteurs à utiliser la simulation continue.

La simulation discrète, par son principe de fonctionnement, est capable de décrire des systèmes changeant à des instants particuliers. Elle peut donc facilement traduire les pannes des ressources, les pauses des opérateurs, les changements d'équipes, etc. C'est également l'avis de [Crespo Marquez et al., 1993] qui encouragent l'utilisation de la simulation discète lorsque interviennent de fortes discontinuités. La simulation continue peut, quant à elle, traduire facilement le fonctionnement continu des industries de process. La simulation à flux continu exhibe une meilleure précision et rapidité comparée à la simulation conventionnelle discrète. Selon [Edghill et Towill, 1989], un modèle continu permet de donner une tendance globale alors qu'un modèle discret permet d'entrer dans le détail (taille de convoi, unité de conditionnement, positionnement géographique des machines dans l'atelier, etc.), c'est aussi le point de vue de [Sweetser, 1999] qui considère que la simulation à événements discrets est plus appropriée pour les analyses détaillées. [Ruiz Usano et al., 1996] précisent enfin que la simulation continue (la Dynamique des systèmes en particulier) est particulièrement adaptée pour une analyse des tendances d'évolution du système considéré sur un horizon moyen/long terme.

2.2.3 La simulation orientée objet

L'approche par objet consiste à modéliser le système par un ensemble d'objets qui interagissent entre eux par envoi de messages. Grâce à ses propriétés de réutilisabilité, de localité des données et de sa capacité d'intégration des informations, l'approche objet est

adaptée à la problématique de l'étude des systèmes complexes, en particulier, les CLs [Botta-Genoulaz et al., 2008].

Cette structuration du système en objets et non en fonctions, correspond mieux à la réalité des systèmes comme elle améliore également la lisibilité du modèle grâce aux propriétés qu'offre l'approche par objet telles que :

- ***L'encapsulation***, qui traduit la possibilité pour un objet de regrouper à la fois l'aspect statique (données ou attributs) représentant son état et l'aspect dynamique (traitements ou méthodes) représentant son comportement ;
- ***L'héritage***, qui indique la possibilité pour un objet de dériver ses données et ses fonctions automatiquement d'un autre objet. Cette propriété est basée sur le principe de création de nouvelles classes d'objets comme étant descendantes des classes déjà existantes ;
- ***L'abstraction***, qui indique la possibilité d'utiliser l'objet sans connaître les détails de sa définition. Cette caractéristique permet de modifier ou traiter une partie du modèle indépendamment des autres parties.

La lisibilité, associée à ces propriétés, est très intéressante dans le cas des systèmes de grande taille, car elle permet de réduire le temps de développement du modèle (construction, modification, utilisation) en diminuant sa complexité par une structuration modulaire et hiérarchique, et en permettant la réutilisation de modèles ou de propriétés déjà définis.

Plusieurs méthodes objets sont apparues durant la période (1990-1995) (Booch, Classe-Relation, Fusion, HOOD, OMT, OOA, OOD, OOM, OOSE...) [Gabay, 1998]. Néanmoins, aucune méthode ne s'est réellement imposée.

UML (Unified modeling language) appliquée dans le domaine de modélisation des systèmes d'information, est l'une des méthodes les plus connues à l'heure actuelle. Elle est définie comme un langage d'unification des autres méthodes objet [Booch et al., 1997 ; Douraid et al., 2012]. Ce langage adopte une représentation pseudo formelle, à base de notations graphiques normalisées, il permet de représenter plusieurs vues complémentaires d'un système, avec plusieurs niveaux d'abstraction. Il appréhende trois axes de modélisation principaux (cf. figure II.1) :

- L'axe fonctionnel traduit par des modèles permettant de représenter le fonctionnement du système dans son environnement extérieur, vis-à-vis de l'utilisateur ;

- L'axe statique traduit par des modèles représentant le système physiquement (description des éléments et de leurs relations) ;
- L'axe dynamique traduit par des modèles montrant le comportement du système, à partir de diagrammes d'état transition, d'activité et de collaboration.

Figure II.1 *Axes de modélisation UML.*

Ces trois axes de modélisation impliquent plusieurs diagrammes pour présenter différents points de vue. Chaque diagramme ***UML*** correspond à un point de vue particulier de modélisation et il contient des attributs de placement et un rendu visuel. Chacun de ces types de diagrammes regroupe des éléments et des liens entre ces éléments au sein de divers ensembles traduisant ainsi une structure et une sémantique précise.

Bien qu'UML soit devenu un support de communication performant, permettant une représentation claire et élégante pour la description des systèmes, il n'est pas encore une méthode dans la mesure où il ne présente aucune démarche ou processus d'élaboration des modèles.

[Rossetti et Chan, 2003] ont développé une démarche de modélisation orientée objet pour mettre en œuvre une plate-forme de simulation des CLs ; l'outil permet de générer, à partir de composants, des scénarios de simulation, avec également un système de bases de données relationnelles permettant une instanciation facile des modèles.

[Chatfield et al, 2005] proposent une architecture de simulation orientée objets pour la création, le stockage et l'exécution du modèle via un langage d'échange d'informations basé sur XML (Supply Chain Modeling Language). Le domaine de l'étude et les objectifs de simulation guident les phases de conception des modèles. [Biswas et Narahari, 2004] proposent un outil de simulation composé d'une bibliothèque d'objets (éléments de la CL) et d'un modèle objet pour la résolution de problèmes supportant les techniques d'optimisation et de simulation. Ces travaux ne reposent pas sur une approche de modélisation qui s'appuie sur une vision de domaine.

2.2.4 La simulation orientée Agent

Historiquement, les systèmes Multi-Agents se positionnent au carrefour de la programmation (logiciels), de l'intelligence artificielle (autonomie de décision), et des systèmes répartis (décentralisation). Le domaine des systèmes Multi-Agents a vu le jour pendant les années 80 sous le nom d'Intelligence Artificielle Distribuée [Huhns, 1987], et d'Intelligence Artificielle Décentralisée [Demazeau et Müller, 1990] ou Systèmes Multi-Agents.

L'approche distribuée Multi-Agents s'adapte bien avec la nature d'une CL généralement composée de plusieurs équipements, où il faut intégrer plusieurs fonctions ou acteurs (approvisionnement, production, transport, distribution, etc.) et où les décisions doivent se prendre à plusieurs niveaux. L'objectif des Systèmes Multi-Agents (ou SMA) est de concevoir des approches d'analyse et de développement de communautés d'agents intelligents qui interagissent de façon coopérative, mais aussi parfois conflictuelle ou concurrente. Selon [Ferber,1995], un SMA est constitué d'un ensemble d'objets, un ensemble d'agents, un ensemble de relations unissant les objets (et donc des agents) entre eux, un ensemble d'opérations permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets et un ensemble d'opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (cf. figure II.2).

Un agent est caractérisé par un état et un comportement tout comme l'objet. À la différence de ce dernier, il possède des objectifs et travaille de façon à les atteindre. Ainsi un agent possède une partie de connaissance et doit interagir avec les autres agents afin que le problème global soit résolu [Bousquet, 2001].

Les SMA, apportent un formalisme fort pour les mécanismes de prise de décision et de coopération, mais ne répondent pas complètement aux processus de transformation de la matière.

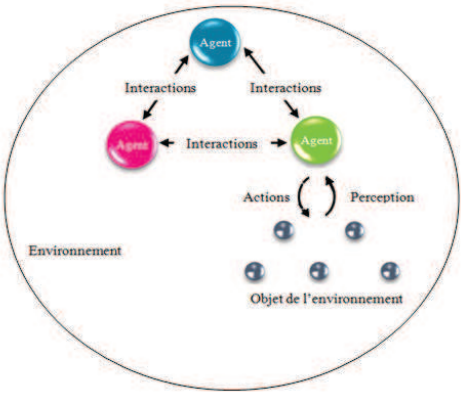


Figure II.2 *Représentation d'un SMA selon [Ferber, 1995].*

L'importance grandissante des SMA dans le paysage scientifique et technologique a attiré de plus en plus d'adeptes de la communauté travaillant sur la modélisation et la simulation de la CL. D'après [Monteiro et al., 2008], les entreprises doivent faire face à de nombreux problèmes décisionnels liés à l'intégration et à la gestion de leurs organisations dans un environnement fortement stochastique. Dans cette optique, les caractéristiques des SMA semblent être particulièrement adaptées pour la représentation et la simulation des systèmes industriels dynamiques. En effet, il existe une forte analogie entre les caractéristiques architecturales et les pratiques organisationnelles des SMA et de la CL. Les deux systèmes sont considérés comme un réseau d'entités et d'acteurs qui interagissent au sein d'une organisation afin d'atteindre un objectif commun, [Yuan et al., 2002].

[Labarthe et al., 2007] ont développé une démarche de modélisation en utilisant des SMA ce qui permet de simuler le comportement des CLs dans des environnements de production de masse personnalisée. Une plateforme de modélisation et de simulation dite « Multi Agent Collaborative Supply Chain MACSC » basée sur des agents BDI (Belief, Desire, Intention) évoluant dans une organisation AGR (Agent-Groupe-Rôle) à été proposée par [Gamoura et Derrouiche, 2013]. Des modèles d'agents a comportements multiples, encore appelés agents hybrides, ont été proposés par [D'amours et al., 2007 ; Forget et al., 2008] pour modéliser les processus de négociation et de planification de la chaîne.

2.3 Approche organisationnelle

Ces approches de modélisation représentent l'organisation, que ce soit système de production, entreprise, CL, à partir de ses entités, ses activités, ses processus, ses fonctions, sa structure et son comportement. Nous appelons les modèles qui découlent de cette approche de modélisation "les modèles organisationnels". Ces approches organisationnelles peuvent être distinguées en approches hiérarchiques (cartésienne et systémique) ou approches hétérarchiques.

2.3.1 Approche hiérarchique

Selon le cadre théorique à partir duquel les approches de modélisation ont été découlées, on distingue deux types d'approches : approche cartésienne et approche systémique.

2.3.1.1 L'approche cartésienne

Selon [Tardieu et al., 1989] cette approche est basée sur les concepts et techniques de décomposition hiérarchique d'une fonction en sous-fonctions, jusqu'à atteindre un niveau

suffisamment fin, permettant ainsi d'avoir un panel de granularité assez étendu par rapport aux autres approches. Parmi les formalismes de cette approche les plus utilisés dans la modélisation de l'entreprise et de la CL nous citons : la méthode **SADT**, *Structurée Analysis and Design Technique* [Ross et Schomann, 1977], la méthode **IDEF0** Integration Definition For Function Modeling [Vernadat, 1999], la méthode ***SA-RT*** *Structured Analysis – Real Time* [Ward et al., 1985],…, etc. Cependant, cette approche prend peu en compte les interactions entre les sous-systèmes.

2.3.1.2 L'approche systémique

Cette approche est à l'inverse de l'approche cartésienne qui dissocie, partage et décompose, l'approche systémique associe et rassemble dans le but de prendre en compte l'ensemble d'une problématique de façon globale [Donnadieu et Karsky, 2002]. Elle repose sur l'appréhension concrète d'un certain nombre de concepts tels que : *la complexité, l'interaction, la globalité*, *le système* etc.

- *La complexité* convient d'aborder, sans simplification, toutes les difficultés de compréhension (flou, incertain, imprévisible, ambiguë, aléatoire) posées par l'appréhension d'une réalité complexe ;
- *L'interaction* implique que chaque élément peut s'informer et agir sur l'état des autres ;
- *La globalité* exprime l'idée que les interactions entre les différents éléments d'un système ne peuvent s'appréhender qu'au niveau de la totalité et non au niveau des éléments pris séparément ;
- *Le concept système* indique pour un ensemble d'éléments en interaction dynamique, sa frontière dans l'environnement, son but à atteindre, son évolution et son organisation (cf. figure II.3) [De Rosnay, 1975].

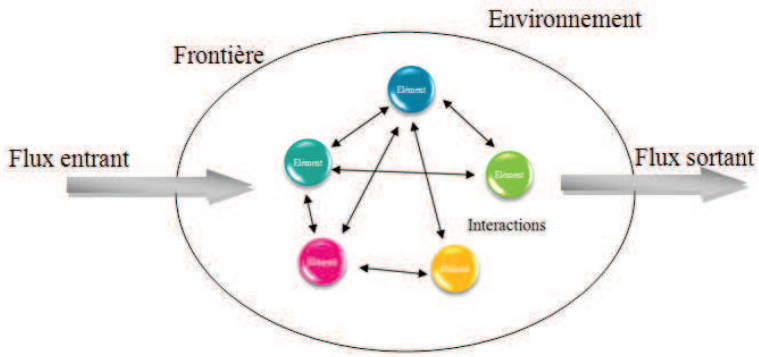


Figure II.3 *Représentation d'un système.*

Selon cette approche, un système sociotechnique (qui pourra être une administration, un atelier de production, une usine, une CL…etc.) est un système dynamique composé de trois sous-systèmes fondamentaux [Le Moigne, 1977] :

- *Un système physique ou système opérant,* chargé de la réalisation des tâches physiques en agissant sur les produits grâce à des ressources humaines, physiques et techniques ;
- *Un système d'information,* qui gère les données et capitalise des connaissances ;
- *Un système de décision,* qui fixe les objectifs et modifie par ses décisions le comportement du système physique et l'environnement du système global.

Ces trois sous-systèmes mettent en œuvre trois types de flux, à savoir, le flux d'information comme intermédiaire entre le flux de décision nécessaire à la conduite au niveau du système de décision et le flux physique correspondant à l'exécution des tâches au niveau du système physique (cf. figure II.4).

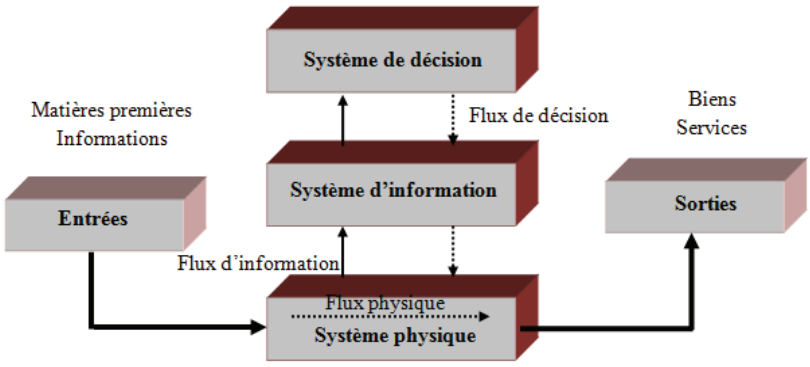


Figure II.4 *Représentation d'un système sociotechnique selon l'approche systémique [Le Moigne, 1977].*

Parmi les approches systémiques existantes pour la modélisation dans l'entreprise et la CL, nous pouvons citer : ***Merise*** [Tardieu et al., 1989], ***CIMOSA*** *Computer Integrated Manufacturing-Open System Architecture* [AMICE, 1993], ***GRAI*** *Graphe de Résultats et Activités Inter reliés* [Doumeingts et al., 2000].

2.3.2 Approche hétérarchique

Sur la base des travaux présentés dans [Duffie, 1990], de nombreuses approches de modélisation appréhendent l'organisation de la CL selon une vision hétérarchique. L'organisation est composée d'éléments autonomes (responsables du contrôle de leurs activités), coopérants et reliés via un réseau de communication [Labarthe, 2006]. L'évolution des architectures dans les systèmes manufacturiers, caractérisée par l'autonomie et l'interaction entre les composants, est présentée dans [Dilts et al., 1991]. Dans le cadre de la

modélisation des systèmes de pilotages hétérarchiques, [Trentesaux, 2002] recense trois approches de modélisation : l'approche par processus, l'approche holonique et les approches en émergences.

2.3.2.1 L'approche par processus

Cette approche représente l'organisation comme un ensemble d'entités, en interactions, pour la réalisation de processus et/ou d'activités. A l'origine des travaux de [Duffie, 1990], ces modèles d'entités représentaient des processus.

Le modèle ***SCOR*** (*Supply Chain Opération Référence*) du *Supply Chain Council,* s'intéresse au diagnostic, à la conception, la mise en œuvre, l'évaluation et le contrôle du SCMs. Ce modèle s'appuie sur la définition de cinq processus : *Plan, Source, Make, Deliver* et *Return.* La démarche débute par un *Business Process Reengineering* permettant de capturer les processus existants afin de les transformer en de nouveaux processus désirés. L'étape suivante s'appuie sur le *Benchmarking.* Il s'agit de quantifier les performances opérationnelles des concurrents en vue de les transformer en objectifs internes pour améliorer la gestion de l'organisation considérée. Enfin, l'analyse des meilleures pratiques ou *Best Practices* caractérise les systèmes d'organisation et d'information qui produisent les meilleures performances.

Le projet NetMan, [Montreuil et al., 2000 ; Frayret *et al.,* 2001], propose un cadre de modélisation de réseaux manufacturiers, au sein duquel, les entités représentent des unités d'affaires responsables, autonomes et génératrices de profit. Ces unités ou centres NetMan interagissent selon différents modes de coordinations basés sur le partage de flux matériels et informationnels.

2.3.2.2 L'approche holonique

Cette approche repose sur la représentation des entités de l'organisation à partir de holons, [Koestler, 1990]. Les holons sont généralement constitués de deux parties, l'une traitant des flux d'informations et la seconde des flux physiques, [Van Brussel et al., 1998]. Un système d'holons qui coopèrent pour l'atteinte d'un but ou d'un objectif commun est dénommé une holarchie [Van Leeuwen et Norrie, 1997]. Une vision détaillée des ***HMS*** *(Holonic Manufacturing System)* est présentée dans [McFalarme et Bussman, 2000].

2.3.2.3 Rapproches en émergences

Les approches bioniques, adaptent les modèles issus de la science du vivant aux systèmes industriels [Okino, 1993]. Les approches fractales, utilisent les propriétés des

structures fractales pour représenter l'organisation [Warnecke, 1993 ; Venkatadri et al, 1997]. Une comparaison entre les approches holoniques, bioniques et fractales est présentée dans [Tharumarajah, 2003].

2.4 Approche économique

Ce sont des modèles issus des théories économiques de l'utilité et des jeux de stratégies, dont l'objectif est l'évaluation de fonctions d'utilité en se basant sur des formalismes de comportement des entreprises considérées comme des agents économiques. [Christy et Grout, 1994] utilisent la théorie des jeux pour modéliser une relation de fournisseur/donneur d'ordre afin de déterminer sous quelles conditions des stratégies sont gagnantes. [Cachon et Lariviere, 2001] étudient des stratégies de partage de prévisions dans une CL avec un fabricant qui fait face à une demande stochastique. Le constructeur fournit sa prévision initiale au fournisseur avec un contrat, le fournisseur définit la capacité (s'il accepte le contrat), le fabricant reçoit une mise à jour des prévisions et fait un ordonnancement définitif. Les termes du contrat peuvent être ou pas respectés (gonfler les prévisions par exemple).

Dans ce jeu, il s'agit de déterminer quelle est la stratégie à adopter par chacun des joueurs pour optimiser les gains de la chaîne. [Viswanathan et Piplani, 2001] proposent un modèle pour étudier et analyser les bénéfices de coordonner la chaîne d'approvisionnement à travers une gestion partagée des niveaux et fréquences de recomplètement des stocks. Le vendeur précise un niveau de recomplètement à tous les acheteurs et exige le respect des délais. Le fournisseur offre une remise de prix pour inciter les acheteurs à accepter cette stratégie. Les remises de prix qui seront offertes par le vendeur sont déterminées par la résolution d'un jeu (Stackelberg game), qui est un jeu stratégique séquentiel où une firme leader décide en premier et où des firmes suiveuses jouent ensuite. Après avoir développé une méthode pour résoudre le jeu, une étude numérique est menée pour évaluer le bénéfice de telles stratégies de coordination.

[Li et al., 2002] étudient la problématique de l'impact des promotions dans les stratégies de marketing. Un modèle de coordination de l'investissement publicitaire entre un donneur d'ordre et son fournisseur permet d'améliorer les bénéfices par rapport à une stratégie classique de leader/suiveur et ce par une meilleure coordination de la CL (partage de risques et de gains). [Taratynava et al., 2008] ont étudié une chaîne à deux niveaux en utilisant le formalisme de la théorie de jeux. Ils ont montré que le producteur a tendance à exagérer les

prévisions de la demande afin de garantir des réserves suffisantes de produits intermédiaires. Le fournisseur prend en compte la stratégie du producteur et ne fait pas confiance à ses prévisions. L'équilibre du jeu conduit alors à une solution sous-optimale pour les deux acteurs.

[Wang et Gerchak, 2003] analysent un système d'assemblage confronté à une demande aléatoire. Dans le premier jeu analysé, l'assembleur (le meneur) décide un prix d'achat pour chaque composant et les fournisseurs (les suiveurs) décident leurs capacités de production. Dans le deuxième cas, les fournisseurs (les meneurs) décident leurs prix de vente et l'assembleur (le suiveur) décide sa capacité de production. [Caldentey et Wein, 2003] étudient un système de production/stockage avec un fournisseur qui décide de sa capacité de production et un détaillant qui décide de son niveau de stock nominal. Ils déterminent l'équilibre de Stackelberg en considérant d'abord le fournisseur comme le meneur et ensuite le détaillant comme le meneur.

2.5 Offre logicielle

De multiples applications informatiques ont été développées dans divers domaines industriels [Molet et al., 2006] : ***GPAO*** (*Gestion de Production Assistée par Ordinateur*), supervision d'ateliers, stockage automatisé, contrôle statistique des opérations, développement produit, conception,… [François, 2007]. Dans les années 80, le ***CIM*** *Computer Integrated Manufacturing* a permis une première intégration des activités de production. La généralisation du concept d'intégration de systèmes informatiques et des processus « métier » dans tous les domaines de l'entreprise a donné naissance aux ***ERP*** *Enterprise Resource Planning*, extension du terme ***MRP*** *Manufacturing Resource Planning* [Bourrières et al., 2005]. Pour résumer, un ***ERP*** fournit à l'ensemble des acteurs de la CL une image unifiée basée sur un système d'information, intègre, cohérente et homogène de l'ensemble des informations dont ils ont besoin [Botta- Genoulaz et al., 2008]. De plus, le but des systèmes d'information est de réduire l'incertitude des informations en travaillant sur quatre notions : la disponibilité, la représentabilité (précision de l'information par rapport au message à transmettre), le délai entre l'occurrence d'un événement et sa prise en compte, la périodicité du renouvellement des informations [Dominguez et Lashkari, 2004]. Cependant, les progiciels de type ***ERP*** visent une centralisation de l'information. Ce système transactionnel demande désormais d'être complété par des systèmes décisionnels ou d'aide à la décision dans un but d'optimisation dépassant les frontières de l'entreprise.

Les ***APS*** *Advanced Planning Systems* sont nés de l'ajout de fonctionnalités autour des ***ERP*** dans le domaine de la planification des activités de production. Les ***APS*** peuvent notamment prendre en compte la capacité finie des ressources lors de la planification, simuler plusieurs scénarios de planification et gérer plusieurs sites de production, ce qui est nécessaire dans le cas des entreprises multi-sites ou des réseaux d'entreprises [François, 2007].

D'autres progiciels spécialisés et dédiés au SCM, gravitant toujours autour des ***ERP***, ont été développés : ***SRM*** *Supplier Relationship Management*, ***CRM*** *Customer Relationship Management*, ***MES*** *Manufacturing Execution System*, ***SCE*** *Supply Chain Execution*, ***WMS*** *Warehouse Management System*, ***TMS*** *Transport Management System*, ***AOM*** *Advanced Order Management*. A ceux-ci s'ajoutent encore des logiciels relatifs à la conception et au cycle de vie des produits ***PLM*** *– Product Lifecycle Management*. Enfin, les ***EDI*** *Electronic Data Interchange* pour l'échange des données informatisé.

Face à un tel foisonnement de progiciels et d'éditeurs, les industriels sont parfois un peu perdus quant au choix des logiciels visant à améliorer leur performance. De plus, l'implantation et la configuration de ces progiciels sont souvent très lourdes (en temps et en ressources), et les résultats attendus ne sont pas toujours au rendez vous [Botta-Genoulaz et Millet, 2008]. Par ailleurs, une étude dans une entreprise multinationale montre que les principes de base de la CL ne sont pas encore bien ancrés dans les esprits des managers [Morana et Paché, 2000].

Nous pouvons illustrer les principales approches de modélisation des CLs abordées précédemment par la figure II.5 :

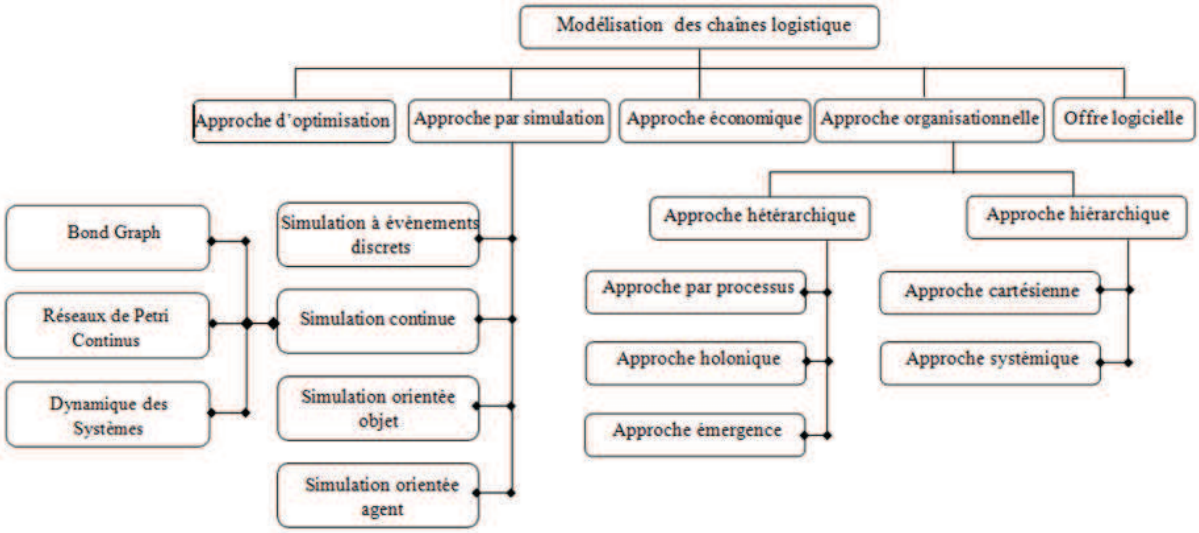


Figure II.5 *Les différentes approches de modélisation des chaînes logistique.*

Nous venons, à travers les sections précédentes de décrire les différentes approches et méthodes de modélisation de la CL. L'utilisation de telles approches est primordiale pour l'étude de l'évaluation de performance de la CL. La section qui suit a pour objectif de répondre aux deux questions suivantes: comment définir la performance ou les performances d'une CL et comment mesurer ces performances.

3. MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME DE MESURE DES PERFORMANCES

Rappelons que l'objectif principal de modélisation de la chaîne logistique est la recherche de la meilleure localisation et organisation de tous les acteurs principaux de la chaîne (fournisseurs, usines, centres de distribution, connexions de transport, etc.) dans un but de servir, au client final, le bon produit, avec la qualité exigée, au bon moment et à moindre coûts. Il est alors indispensable de mesurer les performances de la chaîne afin de savoir si l'amélioration de certaines de ses activités est nécessaire [Beamon et Chen, 2001].

Le système de mesure permettant l'évaluation de la performance n'est pas évident à mettre en œuvre. Des questions fondamentales peuvent être mises en évidence : que faut-il mesurer ? À quelle fréquence mesurer ? Quand faire des révisions de ces mesures ? [Beamon, 1999 ; Chan et Qi, 2003]. Et enfin, où est-il pertinent de mesurer ? Il est de plus difficile de mettre en évidence des corrélations entre ces indicateurs. Cette partie donne un aperçu des modèles de référence, existant dans la littérature, qui permettent l'évaluation de la performance dans la CL. L'objectif est de saisir les différentes vues d'analyse et de comprendre leur mise en œuvre pour l'évaluation de la performance. Quelques approches issues de la littérature récente sont présentées dans l'ordre chronologique :

3.1 La méthode ECOGRAI 1990

ECOGRAI est une méthode pour concevoir et implanter les systèmes d'indicateurs de performance[8] pour les entreprises industrielles ou de services [Bitton, 1990 ; Merle, 1993 ; Doumeingts et al., 2000]. Il existe deux étapes principales dans cette méthode : la conception et l'implantation. Le résultat de la phase de conception est un ensemble cohérent de fiches de spécifications décrivant chaque indicateur de performance (indicateurs, acteurs concernés, informations et traitements nécessaires, etc.). L'implantation et l'exploitation du système d'indicateurs de performance peuvent être supportées par des outils logiciels décisionnels.

[8] Le système d'indicateur de performance est un ensemble d'indicateurs exploités pour une finalité commune, l'aide au pilotage, il peut être vu comme une structure composée d'indicateurs ayant entre eux un certain nombre de liens [Clivillé, 2004].

L'originalité de cette méthode ne se trouve pas au niveau de la définition des indicateurs de performance, mais dans sa démarche de rechercher d'un nombre limité d'indicateurs qui passe tout d'abord par la définition des objectifs, puis l'identification des variables de décision pour arriver enfin à obtenir un nombre limité d'indicateurs cohérents. La démarche de mise en œuvre de la méthode ECOGRAI est basée sur la démarche de mise en œuvre de la méthode GRAI. En particulier, les notions d'implication et d'approches descendante et ascendante ont été reprises.

3.2 La méthode ABC – ABM 1991

Le modèle *ABC-ABM* (Activity Based Costing – Activity Based Management) est apparu à la fin des années 80. Il répond à des besoins accrus d'analyse et de réactivité en environnements complexes et s'applique particulièrement aux secteurs dans lesquels les coûts indirects sont prépondérants. Le modèle se base sur l'analyse et le pilotage des coûts par activités pour une approche transversale orientée processus métiers. Il se compose de deux volets : *ABC* consistent à modéliser et mesurer les coûts par activités-processus ; *ABM* fournit aux managers à partir de l'*ABC* les clés pour la maximisation de la performance (Définition d'objectifs, arbitrages, planification d'actions, suivi des objectifs,…) [Berrah, 1997 ; Gosselin et Ouellet, 1999 ; Oger ,1999 ; Le Clainche, 2001].

Comme pour ECOGRAI, un modèle d'indicateurs est proposé sous forme de triplet (objectif, mesure, variable) qui permet d'exprimer une performance tant quantitative que qualitative [Berrah, 1997]. Les objectifs sont décomposés selon un modèle cause-effet qui est basé sur le modèle processus /activités de l'entreprise [Lorino, 2001]. Les méthodes ABC /ABM insistent sur les liens entre indicateurs de résultat et indicateurs de processus afin de garantir la réactivité du pilotage à travers la décomposition des objectifs [Clivillé, 2004] et l'agrégation des performances [Berrah, 2002].

Les tableaux de bord, qui regroupent les indicateurs par famille de facteurs de progrès, niveau de décision et processus [Berrah, 1997], permettent alors :

- De faire apparaître les liens entre indicateurs ;
- De privilégier l'amélioration de la performance globale ;
- De respecter la logique du déploiement de la stratégie sur les processus/activités.

La démarche de mise en place reprend le principe de l'amélioration continue et le système d'indicateurs est sans cesse remis en question. Les indicateurs sont conçus puis supprimés ou changés de nature dès lors que les objectifs sont atteints.

3.3 Le Balanced ScoreCards (BSC) 1992

Le tableau de bord prospectif a pour objectif de compléter les indicateurs de performance purement financiers par des indicateurs fonctionnels, et de donner, grâce à un ensemble limité d'indicateurs, une vue compréhensive de la façon dont les résultats sont obtenus, de tirer les acteurs vers une vision globale, celle de la stratégie, en mettant l'accent sur les interrelations entre les quatre axes suivants (cf. Figure II.6):

- L'axe *performance financière,* renferme des indicateurs tels que les prix des produits ou les coûts des fournitures, les salaires, les coûts de transports, la valeur ajoutée de la productivité, le taux de rotation de capitaux. Ces indicateurs sont relativement faciles à mesurer mais ne fournissent pas une image assez complète du bon déroulement des activités de la CL.
- L'axe *processus interne,* renferme des indicateurs tels que les prévisions des ventes, la qualité de production, la flexibilité de production, les temps de cycles internes. Ces indicateurs évaluent la performance opérationnelle et ne sont pas liés nécessairement aux résultats financiers.
- L'axe *clients,* renferme des indicateurs qui déterminent la performance orientée client comme la livraison à temps, le cycle d'exécution de la commande, le taux de satisfaction client et la conformité d'exécution de la commande.
- L'axe *apprentissage organisationnel*, est la dimension la plus difficile à définir, ses indicateurs quantifient l'efficacité de l'entreprise dans l'intégration de nouvelles compétences.

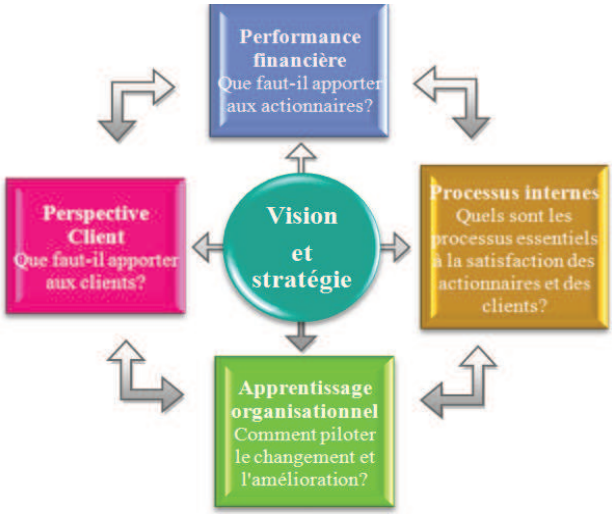


Figure II.6 *Les quatre axes du Balanced Scorecard [Kaplan et Norton, 2001].*

Le principe fondamental de cette approche est finalement de considérer l'évaluation de performance comme une résultante de la mise en œuvre des processus [Kaplan et Norton,

2001]. C'est-à-dire que la performance n'est pas vue comme une simple mesure des résultats d'une action, mais comme un relevé de la pertinence de l'utilisation des variables d'action. Ces variables sont appelées déterminants de la performance et sont les leviers qui permettent de produire les sorties souhaitées à partir d'entrées déterminées, de moyens donnés et en fonction de consignes explicites.

3.4 Le modèle SCOR 2000

Le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference) a été développé par le Supply Chain Council (SCC) ayant pour objectif de définir un guide standard pour les entreprises, il définit une démarche, des processus, des indicateurs et les meilleures pratiques du moment pour représenter, évaluer et diagnostiquer la CL. Son objectif est d'apporter un soutien aux entreprises dans le domaine du pilotage des CLs par la diffusion des bonnes pratiques. Le modèle SCOR issu de cette volonté en est aujourd'hui à sa neuvième version. Plusieurs auteurs appliquent SCOR ou s'en inspirent pour leurs modèles. La rigueur dans les définitions des processus et des indicateurs de performance crée un langage commun dans toute la CL [Huan et al., 2004 ; Lambert et al., 2005 ; Huang et al., 2005 ; Danish et al., 2008 ; Verdouw et al., 2010]. Le modèle replace la CL interne de l'entreprise au sein de la CL étendue avec clients et fournisseurs (cf. Figure II.7). Il identifie cinq processus de niveau 1[Baumann, 2011] :

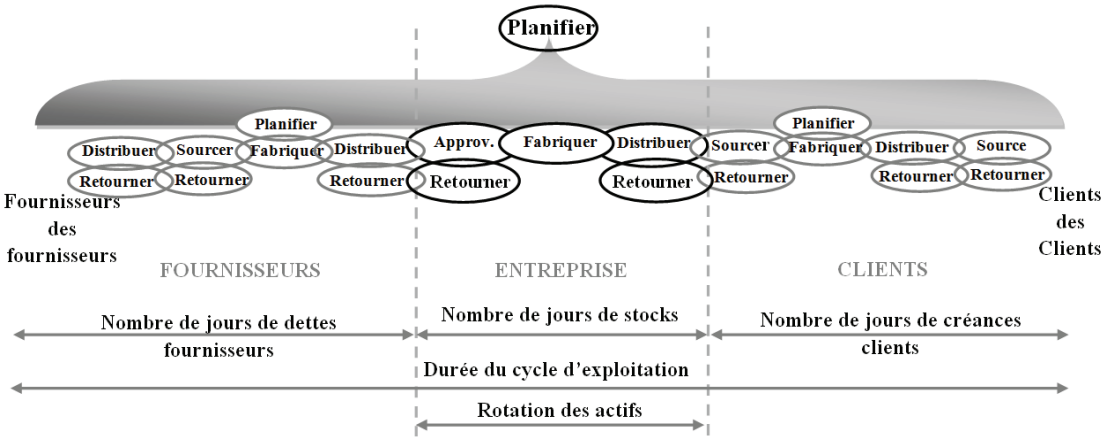


Figure II.7 *Le modèle SCOR version 8.0 (Source SCC).*

- *Planifier,* correspond à la mise en adéquation des capacités avec la demande (planification des stocks, priorisation des demandes, ..) ;
- *Approvisionner,* regroupe l'ensemble des actions concourant à la mise à disposition des matières premières ou services conformément aux plannings incluant notamment la commande, la réception, le contrôle des matières ;

- *Fabriquer*, contient l'ensemble des actions de transformation du produit ;
- *Distribuer*, correspond à l'ensemble des étapes qui permettent de livrer le produit conformément à la demande (gestion de la commande, stocks, transport...) ;
- *Retourner*, a été intégré au modèle de référence à partir de la version 4.0 [SCC, 2000] et ne cesse d'évoluer depuis, il regroupe les activités de pilotage des flux retours des produits incluant entre autres, les fonctions d'autorisation, de planification, de réception et de vérification.

Le modèle SCOR comporte aussi quatre niveaux d'analyse. Le premier fournit un cadre d'analyse structuré sur la base des processus propres à toute CL. Le deuxième niveau s'intéresse aux catégories de processus permettant de définir la configuration de chaque chaîne en accord avec ses activités stratégiques. Le troisième niveau décompose chaque processus en éléments plus détaillés permettant l'identification des flux d'entrées et de sorties, des indicateurs de performance et des meilleures pratiques pour chacun d'entre eux. Le quatrième niveau est spécifique à chaque cas d'étude et consiste en le déploiement et la mise en œuvre des processus et des bonnes pratiques.

Le modèle SCOR définit une structure hiérarchique des indicateurs clés de performance en parfaite corrélation avec la structure des entreprises. Le modèle rend possible la sélection d'indicateurs adéquats en fonction de la typologie de CL [La ville et Paul, 2007]. Il propose 13 indicateurs : Performance d'exécution des livraisons, Taux de livraison d'une commande sur stock, Taux de livraison parfaite, Délai d'exécution d'une commande, Temps de réponse de la CL, Flexibilité de la production, Coût total de la CL, Coût des produits vendus, Valeur ajoutée liée à la productivité, Coût de la garantie, Durée du cycle d'exploitation, Nombre de jours d'inventaire, Rotation des actifs [Supply Chain Council, 2006].

3.5 Synthèse de l'analyse bibliographique

Dans la littérature, les systèmes de mesure de la performance se sont succédés au cours de ces dernières années pour offrir un large panel d'outils à la disposition des décideurs. Chacun de ces modèles possède ses particularités et une démarche d'implantation propre. L'objectif n'est pas de comparer ou arbitrer entre ces systèmes, mais plutôt de consolider l'idée d'une nécessité continuelle d'amélioration et de suivi de la performance. En effet, les méthodes citées sont orientées majoritairement vers l'évaluation de la performance en exploitation de CLs existantes. [Seuring, 2002] nomme la performance a posteriori nécessitant

des mesures d'indicateurs de performances et des actions correctives à envisager afin d'améliorer le système réel [Frein, 1998 ; Tahon et Frein, 2000].

Le modèle d'indicateur et le calcul des indicateurs proprement dits sont implicites et conformes à la définition de l'indicateur donné par [Fortuin, 1988] à l'exception d'ECOGRAI et ABC/ABM qui spécifient complètement. La plupart des modèles insistent sur la conception du système d'indicateurs allant jusqu'à proposer des démarches structurées sous forme de guides méthodologiques, le modèle ECOGRAI, ABC/ABM, BSC.

La structure du système donne lieu à plusieurs types de propositions. Une famille qui regroupe le BSC et SCOR propose une structure où les niveaux de définition des indicateurs et les liens de subordination sont préétablis. Dans ces conditions, tout système mis en place dans l'entreprise à partir de cette structure conserve la cohérence garantie par le modèle. Dans la deuxième famille se retrouvent les modèles ECOGRAI et ABC/ABM, les indicateurs ainsi que leurs liens sont mis en place spécifiquement pour une entreprise donnée et ses objectifs globaux. Le modèle ECOGRAI trouve des applications assez nombreuses, utilisées pour l'implantation des systèmes de production ainsi que leur réorganisation [Clivillé, 2004]. Les autres approches, bien que testées en entreprise, n'ont pas connu de réelle diffusion.

De plus, ces modèles ne proposent pas un cadre global pour répondre pleinement à l'ensemble des problèmes. Ils ne prennent pas suffisamment en compte le fait qu'un système d'indicateurs ne doive être mis en place que s'il est associé à un plan d'action destiné à atteindre l'objectif global. Aussi, les outils formels pour exprimer la performance, décomposer les objectifs, agréger les performances sont rares, et généralement réservés à des cas spécifiques [Clivillé, 2004].

Nous présentons, dans la section suivante, les différentes politiques de pilotage de flux données dans la littérature.

4. LES POLITIQUES DE PILOTAGE DE FLUX

En se situant au niveau opérationnel et sur la base du mode de déclenchement des différents processus au niveau des acteurs dans la CL (approvisionnement, production, distribution…, etc), de nombreuses politiques de pilotage ont été développées, dans la littérature, en tenant compte des différentes caractéristiques des systèmes et de l'information renseignant les demandes des clients. Plusieurs classifications de ces politiques de pilotage de flux coexistent. Nous citons ici les plus importantes :

- **Classification classique en politiques à flux tiré et politiques à flux poussé** [Spearman et Zazanis, 1992] ;
- **Classification sur la nature de l'information** en politiques de pilotage par renouvellement de consommation et pilotage par les besoins futurs [Souilah, 2008] ;
- **Classification basée sur le type du système d'approvisionnement** en politiques de pilotage relative à des systèmes avec capacité limitée et pilotage relative à des systèmes avec capacité illimitée [Babaï, 2005] ;
- **Classification en** politiques réactives et en politiques proactives [Arda, 2008].

La classification sur la nature de l'information est celle que nous adoptons ici pour passer en revue les différentes politiques de pilotage afin de montrer comment elles appréhendent le problème de déclenchement des différents processus au niveau des acteurs dans la chaîne. Nous proposons au lecteur intéressé par plus de détails sur ces classifications de se reporter aux différentes références citées.

4.1 Les politiques de pilotage par renouvellement de la consommation

Elles reposent sur le principe de déclenchement des différentes activités au niveau d'un acteur de la CL en se basant sur le comportement passé de la demande. Elles peuvent être classées en deux sous-familles, à savoir : les politiques d'approvisionnement et de stockage et les politiques basées sur le système Kanban. Nous présentons, dans ce qui suit, plus en détails ces politiques.

4.1.1 Politiques d'approvisionnement et de stockage

Selon [Arda, 2008], les politiques d'approvisionnement et de stockage sont les premières politiques de gestion des stocks développées depuis les années 30. Le type de régulation adopté pour déterminer quand et en quelle quantité il faut commander différencie fondamentalement les politiques utilisées. Ces politiques assurent la gestion d'un ou plusieurs stocks alimentés par des systèmes d'approvisionnement qui peuvent être composés d'un ensemble d'activités de production, d'assemblage et de transport, dont l'objectif est de satisfaire la demande du client. A certains moments, des commandes sont passées pour réapprovisionner les stocks. L'intervalle de temps séparant le moment où une commande est passée et la réception des produits est en général appelé délai de réapprovisionnement (L) (cf. Figure II.8). IL correspond, dans la réalité, aux délais engendrés par le lancement de la commande, la fabrication des produits, le transport et la mise en stock.

Pour décider quand et combien commander, il est nécessaire de connaître l'état du stock. Pour cela, il existe deux types de gestion :

- Le suivi continu, le suivi de l'état du stock se fait de manière continue et la décision de réapprovisionnement peut intervenir à tout instant ;
- Le suivi périodique, le suivi de l'état n'est fait que de manière périodique et la décision de réapprovisionnement ne peut intervenir qu'à ces instants.

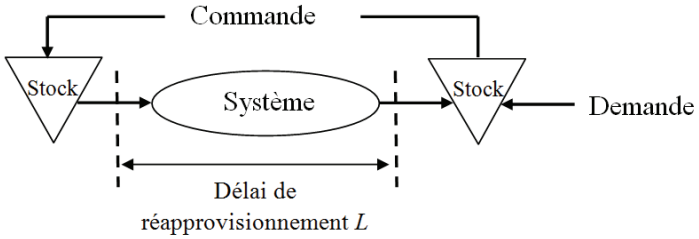


Figure II.8 *Principe de politique de la gestion d'approvisionnement [Arda, 2008].*

Les politiques d'approvisionnement et de stockage servent à répondre aux deux questions fondamentales : quand commander ? et combien commander ? A cet effet, plusieurs politiques de bases existent :

4.1.1.1 Politique à point de commande (r, Q)

Ce système consiste à commander une quantité fixe *Q* à chaque fois que le stock disponible descend à un niveau déterminé *r* dit *point de commande*. Cette commande est réceptionnée à l'issue du délai de réapprovisionnement *L*.

4.1.1.2 Politique à recomplètement périodique (T, S)

Le principe de ce système de base est le suivant. A périodicité fixe, appelée période de révision de longueur *T*, on constate le niveau du stock disponible [Babaï, 2005]. On le ramène alors, par une commande de réapprovisionnement, à un niveau fixe dit *niveau de recomplètement*, noté *S*.

4.1.1.3 Politique à point de commande, niveau de recomplètement (s, S)

Dès que la position du stock descend en dessous du seuil de commande *s*, on recomplète la position du stock jusqu'à un niveau de recomplètement *S*. Contrairement à la politique (*r, Q*) où la quantité commandée est fixe, avec cette politique, la commande est de taille variable [Zheng et Federgruen, 1991]. Le cas particulier de la politique (*s, S*) où les demandes sont unitaires et le seuil de commande est tel que (*s=S-1*), est appelé politique à stock nominal (*Base stock*) qui à son tour est similaire à la politique Finite-Buffer [Ettl, 1995].

La politique Finite-Buffer est une politique assez facile à mettre en œuvre. Elle consiste à produire tant que les stocks de produits intermédiaires ou finis ne sont pas pleins. La demande tire le flux de production en vidant les stocks. Lorsqu'un stock est plein le processus de fabrication qui précède se bloque. Il y a deux types de blocage, après service ou avant service. Si le blocage est avant service, les pièces ne rentreront pas dans le processus de fabrication si le stock qui suit est déjà plein. Quand le blocage est après service les pièces rentrent dans les processus de fabrication même si le stock qui suit est plein. Les pièces sont alors bloquées et elles empêchent que d'autres entrent dans le serveur tant que le stock suivant ne s'est pas vidé d'une unité [Bollon, 2001]. Les processus de fabrication n'utilisent pour leur contrôle que des informations locales et le nombre de pièces dans les mailles est limité. Pour ces deux raisons cette politique peut donc être considérée comme proche du Kankan.

4.1.1.4 Politique (T, r, S)

Dans ce système, les deux politiques (*r, Q*) et (*T, S*) sont combinées. En effet, à la fin de chaque période de suivi *T*, on examine la position du stock. On ne passe une commande que si cette position est inférieure à un seuil *r* de commande. La quantité commandée a pour objectif de ramener la position du stock à un niveau de recomplètement *S*.

4.1.1.5 Politique (T, r, Q)

Le principe de ce système est de combiner les deux politiques (*r, Q*) et (*T, S*). En effet, on revoit périodiquement l'état du stock et à chaque période *T*, si la position du stock est supérieure à un seuil de commande *r*, on ne commande pas, mais si la position du stock descend en dessous du seuil *r*, on commande une quantité fixe *Q*.

4.1.2 Politiques de type Kanban

La philosophie Juste-à-Temps (JAT), dont l'intention principale est de réduire des stocks, a été développée dans les années 70. La politique Kanban a été développée comme un système d'information pour implémenter la philosophie JAT chez Toyota Motors. Le mot « Kanban » signifie « étiquette » ou « carte » en japonais. Dans les systèmes Kanban, les étiquettes sont utilisées pour transmettre les commandes d'approvisionnement entre les étages. La politique Kanban est un mode de pilotage efficace pour traiter les systèmes de fabrication à capacité limitée. Dans ce qui suit, nous allons décrire le principe de fonctionnement de la politique Kanban et ses deux extensions les plus utilisées, à savoir : la politique Kanban Généralisé et la politique Kanban Etendu. Nous présenterons également quelques travaux de la littérature étudiant ces politiques.

4.1.2.1 Principe de la politique Kanban

Selon [Courtois et al., 1995], la politique Kanban s'appuie sur un principe simple « un poste amont ne doit produire que ce qui lui est demandé par son poste aval qui ne doit lui-même produire que ce qui lui est demandé par son propre poste aval et ainsi de suite, le poste le plus en aval ne devant produire que pour répondre à la demande de clients ». La politique Kanban associe à chaque ordre de fabrication ou approvisionnement une autorisation de production appelée Kanban. Les paramètres de contrôle de cette politique sont les nombres de cartes pour chaque étage *i*.

A l'état initial, le stock de l'étage *i* contient *Ki* pièces attachées à *Ki* Kanbans. Lorsqu'une demande se présente au dernier étage (étage 2, dans la figure II.9), si une pièce avec une carte est présente dans le stock, la demande est satisfaite et la carte est détachée pour être transmise en amont. Cette carte propage la demande au point de contrôle précédent. A ce niveau, si une pièce est présente, sa carte est détachée. Elle est remplacée par la carte qui a transmis la demande et la pièce est lancée en fabrication dans le dernier étage. La carte détachée est quant à elle transmise en amont, propageant à son tour la demande. Ce mécanisme peut remonter ainsi toute la chaîne. Cependant, s'il arrive qu'une pièce ne soit pas disponible à un étage, aucune carte n'est transmise. Les cartes de l'étage en question s'accumulent et l'information qui déclenche la production est bloquée à ce niveau de la chaîne.

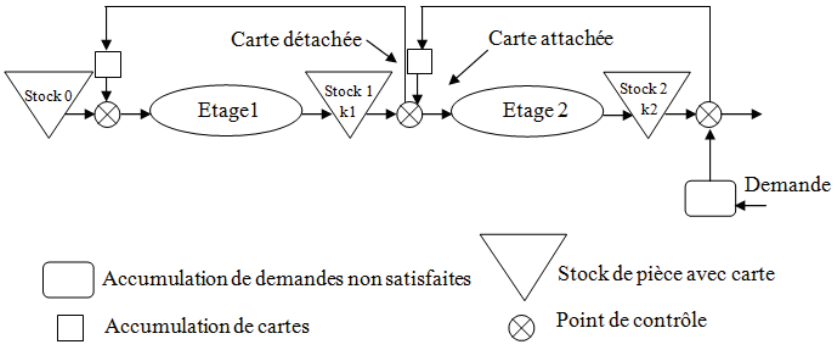


Figure II.9 *La politique Kanban à deux étages.*

En comparaison avec la politique d'approvisionnement et de stockage, la politique Kanban permet une meilleure coordination entre les étages, n'autorisant la fabrication à chaque étage que si une pièce a été effectivement consommée en aval de cet étage. Une conséquence intéressante de ce mécanisme est que le nombre de pièces encours de fabrication est limité par le nombre de cartes de chaque étage. Cependant, la demande pouvant ne pas être immédiatement transmise à toute la chaîne, les délais de fabrication peuvent être plus longs

que pour la politique à stock nominal. Lorsque l'étage représente toute la chaîne de production, le pilotage revient à lancer en production une pièce dans l'usine, dès qu'un produit quitte le système en aval. Ce cas particulier de la politique Kanban est aussi connu sous le nom de CONWIP (CONstant Work In Process).

4.1.2.2 Extensions de la politique Kanban

La politique Kanban a un seul paramètre de contrôle, le nombre de Kanban. Ceci implique une certaine simplicité d'application mais aussi des restrictions [Arda, 2008]. Les extensions de la politique Kanban telles que la politique Kanban Généralisée (KG) et la politique Kanban Etendue (KE) ayant deux paramètres de contrôle ont été proposées dans la littérature.

a. Politique Kanban Généralisée

Selon [Frein et al., 1995], la politique KG peut être considérée comme une politique hybride de la politique de stock nominal et de la politique Kanban. Elle utilise deux paramètres pour chaque étage *i*, le niveau de stock nominal *Si* et le nombre de Kanban *Ki*. Chaque étage *i* a deux paniers de Kanban, un pour les étiquettes de l'étage *i* et un pour les étiquettes de l'étage (*i+1*) représentant les commandes de cet étage. À l'état initial, le stock de l'étage *i* contient un nombre de produits égal au niveau de stock nominal *Si* et toutes les étiquettes de l'étage *i* se trouvent dans le panier de Kanban de l'étage *i*. Lorsqu'une demande arrive, si une unité de produit *i* est présente dans le stock, la demande est satisfaite. Sinon, la demande est retardée. Cette demande est transmise à l'étage (*i–1*), si une étiquette de l'étage *i* est présente dans le panier de Kanban. S'il y a une unité de produit (*i–1*) disponible dans le stock, le produit est envoyé au système de fabrication de l'étage *i* avec l'étiquette de l'étage *i* qui a transmis la demande attachée sur lui. Quand le processus de fabrication est terminé, l'étiquette est détachée et remise dans le panier de Kanban et le produit prend sa place dans le stock de l'étage *i*. S'il arrive qu'une étiquette ne soit pas disponible dans le panier de Kanban d'un étage à l'arrivée d'une demande, aucune étiquette n'est transmise à l'étage en amont et la remontée de la demande est bloquée. La figure II.10 illustre le fonctionnement de la politique KG dans un système à deux étages.

Ainsi, si la politique Kanban bloque la transmission des demandes vers l'amont quand les produits dans le stock d'un étage sont épuisés, la politique KG relâche cette contrainte et bloque la transmission des demandes vers l'amont quand les étiquettes dans le panier de Kanban sont épuisées.

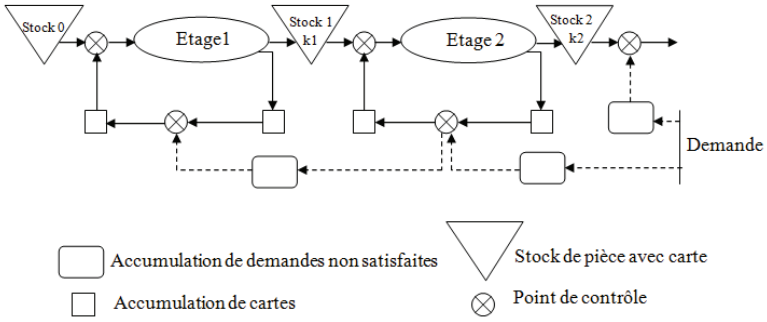


Figure II.10 *La politique Kanban Généralisée à deux étages.*

b. Politique Kanban Etendue

La politique de KE est, comme la politique de KG, une politique hybride de la politique de stock nominal et de la politique Kanban. Elle a été développée plus récemment par [Dallery et Liberopoulos, 2000]. Elle utilise deux paramètres de contrôle pour chaque étage *i*, le niveau de stock nominal *Si* et le nombre de Kanban *Ki* (le nombre de cartes étant supérieur au stock nominal). Dans l'état initial, le stock de l'étage *i* contient un nombre de produits égal au niveau de stock nominal *Si*. Chaque unité dans le stock doit être attachée à une étiquette. Les étiquettes restant (*Ki–Si*) se trouvent dans le panier de Kanban de l'étage (*i–1*). Lorsqu'une demande se présente à l'étage *i*, cette demande est automatiquement transmise à tous les étages en amont. Pour qu'une pièce soit transmise au système de fabrication de l'étage *i*, outre la présence d'une demande, une étiquette de l'étage *i* doit être disponible dans le panier de Kanban de l'étage (*i–1*). Dans ce cas, l'étiquette de l'étage (*i–1*) est détachée pour être transmise à l'étage (*i–2*) est remplacée par une étiquette de l'étage *i*. Ensuite, la pièce entre dans le système de fabrication de l'étage *i*. La figure II.11 illustre le fonctionnement de la politique Kanban Etendue dans un système à deux étages.

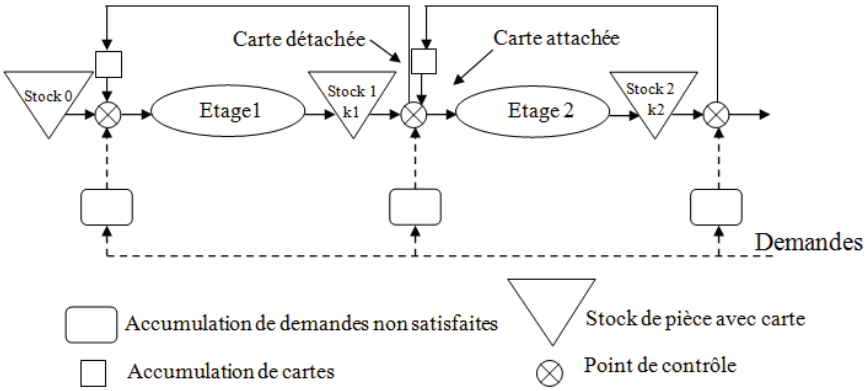


Figure II.11 *La politique Kanban Etendue à deux étages.*

Du fait de l'existence d'un nombre d'étiquettes de l'étage *i* en avance dans le panier de Kanban de l'étage (*i–1*), la politique KE peut délivrer une pièce à l'étage *i*, dès qu'une demande arrive, même si aucune étiquette n'a été libérée à l'étage *i*. Il est également démontré que la politique KE a un temps de réponse face à la demande inférieur à celui de la politique KG.

4.2 Politiques de pilotage par les besoins futurs

Dans la littérature, les politiques de pilotage de flux exploitant la demande future peuvent être distinguées en deux types : la politique ***MRP*** et les politiques de gestion de stocks sur prévisions.

4.2.1 Les politiques du type planification des besoins en composants MRP

Le développement de la méthode planification des besoins en composants ou **M**aterial **R**equirements **P**lanning ***MRP*** a été étroitement lié au développement des moyens informatiques dans les entreprises, initiées par [Orlicky,1975]. Cette méthode s'est fortement répandue depuis et aujourd'hui, tous les logiciels de ***G**estion de **P**roduction **A**ssistée par **O**rdinateur **GPAO*** comportent un module ***MRP***. Plus récemment, la méthode a de plus été complétée par la méthode de planification des capacités de production ou **M**anufacturing **R**esource **P**lanning ***MRP II*** [Courtois et al, 1995], qui généralise le calcul des besoins à des ressources autres que les produits, en particulier aux capacités des machines et aux effectifs.

La politique ***MRP*** consiste à déterminer, pour chaque produit (matière première, composant, produit intermédiaire, produit fini, etc.), le **P**lan **D**irecteur de **P**roduction ***PDP*** qui spécifie les quantités à produire dans chaque période et pour chaque produit, la nomenclature qui spécifie les différents composants intervenant aux différentes étapes de la fabrication des produits, et enfin les délais de production, supposés constants, à chaque étape du processus [Babaï, 2005].

Les besoins exprimés dans le ***PDP*** couvrent généralement les commandes fermes et peuvent s'étendre aux demandes prévisionnelles selon le mode de production. Le principe de fonctionnement de la politique ***MRP*** peut être résumé par les deux notions suivantes :

- *Eclatement des besoins*, les besoins en produits finis, donnés par le ***PDP***, sont transformés en besoins de produits semi-finis et de composants en utilisant la nomenclature.
- *Décalage des besoins*, les besoins calculés sont transmis à tous les niveaux de la chaîne avec un décalage dans le temps suivant le principe de lancement "au plus tard" en tenant

compte des délais de production. Ces décalages sont faits de façon à avoir les composants dans chaque étage et les produits finis juste à temps.

La mise en œuvre de la politique ***MRP*** peut être faite en utilisant des tableaux permettant d'une façon simple de déterminer les décisions de lancement prévisionnelles pour chaque produit et à chaque période de l'horizon.

4.2.2 Politiques de gestion de stock sur prévisions

Dans la littérature, le pilotage de flux basé sur des prévisions de la demande a occupé une place très importante. Les politiques proposées sont généralement des extensions des politiques d'approvisionnement et de stockage. Une partie considérable de ces travaux utilise, en général, une approche de pilotage basée sur des modèles de mise à jour des prévisions.

Les politiques proposées sont généralement des politiques à suivi périodique du type stock nominal. [Lee et al., 1997] ont proposé la première politique de gestion de stock sur prévision, en la nommant le niveau de recomplètement. Dans cette politique, à chaque période, une quantité qui correspond à la différence entre le niveau de recomplètement et la position du stock est commandée. La quantité commandée est livrée après le délai d'approvisionnement. Puisque les prévisions sont variables dans le temps, le niveau de recomplètement est dynamique et chaque période est caractérisée par un niveau de recomplètement [Babaï, 2005].

La deuxième politique étudiée dans la littérature est appelée politique à stock nominal adaptatif. Cette politique est une extension de la politique à stock nominal classique, elle a été introduite par [Graves, 1999]. A chaque période, après avoir observé la demande, la quantité commandée est constituée de deux parties, la première partie permet de réapprovisionner la quantité qui correspond à la dernière demande et qui vient d'être consommée, comme dans le cas d'une politique à stock nominal classique, alors que la deuxième partie sert à ajuster le niveau du stock nominal pour s'adapter au changement de la demande prévisionnelle durant le délai d'approvisionnement. Notons que les modèles de mise à jour des prévisions utilisés dans ces deux politiques, ainsi que dans la majorité des politiques de gestion de stock sur prévisions, se basent sur un modèle connu sous le nom de *Martingale Method of Forecast Evolution MMFE* développé par [Graves, 1986 ; Heath et Jackson, 1994].

5. CONCLUSION

Les différentes études menées pour maîtriser la complexité de la chaîne logistique ont conduit à :

- Développer un large éventail de modèles décrivant les différents aspects de la chaîne logistique ;
- Concevoir et implanter de différents types d'indicateurs permettant la mise en œuvre des systèmes de mesure de performance des chaînes logistiques ;
- Implémenter plusieurs politiques de pilotage des flux dans la chaîne logistique et de mettre en place des mécanismes de collaboration entre ses différents acteurs.

Concernant les modèles, nous avons présenté les approches de modélisation courantes de la chaîne logistique dans la communauté scientifique. Chaque approche étant fondée sur une vision différente. Il s'agit des approches : d'optimisation mathématique, de simulation, organisationnelle, économique et d'offre logicielle.

Dans ce contexte, les modèles d'optimisation mathématique génèrent directement la solution exacte ou approchée pour un objectif de gestion donné. Toutefois, ils sont inappropriés pour des problèmes très complexes ou de grande taille. Comme ils sont souvent impuissants à prendre en compte la réalité temporelle et l'aspect dynamique des processus ainsi que les interactions entre entités dans la chaîne logistique. Les modèles organisationnels, à leur tour, permettent souvent une analyse globale des problèmes de gestion de la chaîne logistique, toutefois ils sont limités aux niveaux langage de représentation (parfois ambigus) et évaluation comportementale. Quant aux modèles économiques, ils sont loin d'être appliqués à un niveau large dans la chaîne logistique car ils ne prennent pas en compte les mesures qui ne sont pas d'ordres financiers. Pour l'offre logicielle, elle propose des solutions logicielles (MRP, APS, SRM, CRM, MES, WMS, TMS, AOM, PLM, CIM, ARENA, PROMODEL,…) prêtes à l'utilisation directe, toutefois ces solutions ne sont pas généralement basées sur des modèles ou des méthodes d'organisation explicites, d'où la source de problèmes de leur d'utilisation. De plus, les configurations de ces logiciels sont souvent très lourdes (en temps et en ressources), et les résultats attendus ne sont pas toujours au rendez vous. Enfin, les modèles de simulation sont caractérisés :

- à l'inverse des modèles mathématiques, par leur prise en compte de l'aspect temporel et dynamique des systèmes complexes et des systèmes à grande échelle ;

- à l'inverse des modèles organisationnels, par leur niveau de représentation très riche souvent graphique et analytique à la fois;
- à l'inverse des modèles économiques, par leur spectre d'application très large dans différents domaines.
- à l'inverse des solutions logicielles, par leur capacité à modéliser les processus de façon plus explicite et formalisée.

Par conséquent, la simulation c'est l'approche idéale pour la modélisation des chaînes logistiques qui sont des systèmes complexes à grande échelle avec un comportement dynamique. Elle permet, d'un côté, de reproduire facilement le comportement des différents acteurs de la chaîne logistique ainsi que leurs interactions. D'un autre côté, elle permet d'effectuer des analyses conduisant à une meilleure connaissance des différentes contraintes opérationnelles, d'implémenter différentes stratégies de pilotage des flux et de mettre en place des systèmes de mesure de performance de la chaîne logistique dans sa globalité.

Certains chercheurs estiment que le comportement global d'une chaîne logistique ne peut être évaluée qu'en utilisant cette approche de simulation bien qu'elle ne génère pas directement la solution optimale d'un problème, comme dans le cas d'une approche d'optimisation, et il s'agit seulement d'évaluer les solutions possibles de ce problème. Ils argumentent cette estimation par le fait que l'analyse du comportement d'une chaîne logistique est parfois plus intéressante que sa configuration optimale, car l'environnement dans lequel elle évolue ne permet pas réellement d'atteindre des solutions stables. C'est dans ce contexte que notre développement d'un modèle de la chaîne logistique rentre dans ce cadre d'approche de simulation comme nous allons voir dans le chapitre suivant.

Concernant les systèmes de mesure de performance des chaînes logistiques, nous avons donné un aperçu sur les méthodes de définition et d'implantation d'indicateurs de performance les plus connues (ECOGRAI, ABC/ABM, BSC, SCOR). Dans ce contexte, la méthode ECOGRAI a comme objectif d'aboutir à un nombre limité d'indicateurs par fonction sur tous les niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel) dans le système à évaluer. Quant au modèle ABC – ABM, il s'applique particulièrement aux secteurs dans lesquels les coûts indirects sont prépondérants. Ce modèle se base sur l'analyse et le pilotage des coûts par activités pour une approche orientée processus. Le modèle SCOR, à son tour, soutient les chaînes logistiques face à la complexité de leurs structures organisationnelles dans la construction et l'utilisation des indicateurs clés de performance. Il définit une structure hiérarchique des indicateurs clés de performance en parfaite corrélation avec la structure de la

chaîne logistique. Ces indicateurs ont deux facettes : l'une orientée sur les performances perçues par le client, et l'autre sur les performances internes des activités dans la chaîne logistique. Enfin, le tableau de bord prospectif BSC a pour objectif de compléter les indicateurs de performance purement financiers par des indicateurs fonctionnels déterminant la performance d'un système industriel selon quatre axes : financier (satisfaction des actionnaires), processus internes (efficacité et efficience de toute la chaîne logistique), client (satisfaction des clients) et apprentissage organisationnel (satisfaction des salariés).

Afin de montrer comment les politiques de pilotage des flux dans la chaîne logistique appréhendent le problème de déclenchement des différents processus au niveau des acteurs dans la chaîne logistique, nous avons passé en revue ces différentes politiques. Bien que plusieurs classifications de ces politiques coexistent, la classification sur la nature de l'information renseignant les demandes des clients est celle que nous avons adoptée. Selon le type d'informations dont on dispose, deux classes de politiques de pilotage sont distinguées : politiques de pilotage par renouvellement de la consommation basées sur le comportement passé de la demande client et politiques de pilotage par les besoins futurs basés sur la demande future du client. On distingue dans la première classe deux sous-familles, à savoir : les politiques d'approvisionnement et de stockage et les politiques basées sur le système Kanban. Dans la deuxième classe, on trouve la politique *MRP* et les politiques de gestion de stocks sur prévision. Pour terminer, nous avons donné un aperçu sur les travaux de référence qui ont étudié ces politiques.

CHAPITRE III

MODELISATION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE PAR LES RESEAUX DE PETRI CONTINUS A VITESSE VARIABLE

Sommaire

1. INTRODUCTION 83
2. PERIMETRE DE L'ETUDE 84
   2.1 Niveau de la modélisation retenue 84
   2.2 Nature de la modélisation retenue 85
   2.3 Finalité de la modélisation retenue 86
3. INTRODUCTION A LA MODELISATION PAR RdPCV 86
   3.1 Concepts de base de la modélisation par RdP 87
      3.1.1 Représentation d'un RdP 87
      3.1.2 Evolution d'un RdP 88
      3.1.3 Equation fondamentale 89
   3.2 Différentes extensions de RdP 89
      3.2.1 Les RdPs temporisés 89
      3.2.2 Les réseaux de Petri continus (RdPCs) 90
         3.2.2.1 Le modèle RdP Continu à Vitesses Constantes (RdPCC) 91
         3.2.2.2 Le modèle RdP Continu à Vitesses Variables (RdPCV) 92
         3.2.2.3 Le modèle RdPC Asymptotique 92
         3.2.2.4 Le modèle RdPC à Vitesses Fonction du Temps 93
      3.2.3 Synthèse sur le choix des RdPCV 93
4. APPORTS DE L'OUTIL RDPCV DANS L'ETUDE DE LA CHAINE LOGISTIQUE 94
5. MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE PAR LES RdPCVs 96
   5.1 Modèles RdPCVs des nœuds de la chaîne logistique 97
      5.1.1 Structure générique d'un nœud dans la CL 97
      5.1.2 Modèle RdPCV d'un acteur de la CL 105
         5.1.2.1 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Kanban 105
         5.1.2.2 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Finite-buffer 112
      5.1.3 Cas spécifique de l'acteur 114
         5.1.3.1 Cas de l'acteur fournisseur 114
         5.1.3.2 Cas de l'acteur producteur 115
            A. Modèle RdPCV de l'acteur fabricateur 116
            B. Modèle RdPCV de l'acteur assembleur 116
            C. Modèle RdPCV de l'acteur désassembleur 119
         5.1.3.3 Cas de l'acteur distributeur 121
            A. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec un entrepôt 121
               a. Typologie de distribution convergente 122

b. Typologie de distribution divergente 125
c. Typologie de distribution convergente/divergente 127
B. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec une plate-forme 128
5.1.3.4 Cas de l'acteur client final 129
5.1.4 Prise en considération du cas multi-produit 131
5.2 Modèles RdPCVs des arcs de la chaîne logistique 133
5.3 Modèle RdPCV globale de la chaîne logistique 136
6. CONCLUSION 139

1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'approche de simulation est l'approche la plus adaptée pour la modélisation et l'analyse des Chaînes Logistiques (CLs) qui sont des systèmes très complexes à grande échelle avec un comportement dynamique. Bien que plusieurs modèles de simulation de la chaîne logistique aient été développés en utilisant différents outils et techniques, on est encore loin de trouver une solution définitive au problème de description des différents phénomènes et aspect de la chaîne logistique. En effet, tous les modèles développés dans ce sens reposent sur des hypothèses simplificatrices, et aucun des modèles existants ne peut appréhender toute la complexité de la chaîne logistique. De plus, nombreux sont les modèles développés dans la littérature qui, quoique bien formalisés, restent très difficiles à implanter pratiquement [Tamani et al., 2008]. Par ailleurs, l'approche globale pour l'étude de la chaîne logistique est souvent évoquée. Cependant, elle est fréquemment limitée en raison du grand volume de données à prendre en considération [Villeminot, 2004] même avec l'utilisation des techniques de simulation les plus répandues, comme la technique de simulation à événements discrets[1] [Robinson, 2005]. D'un autre côté, la majorité des modèles existants sont restreints à des classes particulières de chaînes logistiques et très peu de travaux proposent des modèles génériques pouvant s'adapter à la grande diversité de ces chaînes ou servir de base à l'instanciation de différents cas d'étude similaires. Quand s'ajoute à ces considérations la complexité et l'abstraction de la plupart des outils utilisés dans le développement de ces modèles, la recherche de nouveaux modèles des chaînes logistiques devient une nécessité. Cela laisse le champ de recherche dans ce secteur très largement ouvert et autant de pistes de développement sont possibles. C'est dans ce contexte que nous essayons d'enrichir les modèles de la chaîne logistique existants en proposant un modèle plus adapté aux exigences exprimées ci-dessus.

De telles considérations nous ont amené à proposer une approche globale avec une démarche modulaire et générique pour la modélisation de la chaîne logistique tout en nous fondant sur le potentiel des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable (RdPCV). Le choix de l'outil RdPCV est lié essentiellement d'un côté, à la volonté de pouvoir exploiter les différentes techniques d'analyse issues de l'automatique continue qui permettent dans ce contexte, de la chaîne logistique qui un système à grande échelle mettant en jeu un grand

[1] Cette technique devient très vite limitée lorsque l'on étudie des systèmes mettant en jeu un grand nombre d'entités.

nombre d'entités, d'augmenter considérablement l'efficacité du calcul et de réduire la taille de l'espace d'état. Ce qui permet de pallier les problèmes d'explosion combinatoire inhérents au grand nombre d'états lorsqu'un modèle à événements discrets est utilisé [Balduzzi et al., 2000]. D'un autre côté, ce choix permet une modélisation globale de la chaîne logistique à travers une description à la fois graphique et analytique du comportement dynamique des différents flux. Un tel modèle permet à la fois d'étudier les performances de cette chaîne et de développer des stratégies de pilotage de flux et de contrôle d'une manière cohérente en tenant compte de l'état global de la chaîne.

Bien que le domaine de la chaîne logistique puisse tirer un grand bénéfice de cet outil, très peu de travaux [Smata et al., 2010, 2011a, 2011b , 2011c, 2012 ; Smata 2011], à notre connaissance, ont été menés dans ce domaine.

En effet, jusqu'à maintenant, le champ principal de son application, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, est essentiellement les systèmes de production et de transport.

Avant de présenter notre approche de modélisation de la chaîne logistique, il convient tout d'abord de préciser le périmètre de cette approche.

2. PERIMETRE DE L'ETUDE

Nous délimitons ici le contexte et le périmètre de l'approche que nous allons proposer tout en indiquant le niveau, la nature et la finalité de cette approche et en positionnant notre travail par rapport aux nombreux travaux de recherche dans le domaine, que nous avons présenté auparavant.

2.1 Niveau de la modélisation retenue

Le contexte général de notre étude est celui de la gestion de la CL ou Supply Chain Management "SCM". Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, ce concept du SCM exige une vision globale ou transversale de la CL. C'est dans ce contexte que nous nous intéresserons, dans un premier temps, à la modélisation de la CL dans sa globalité. Vu la taille de la chaîne et le nombre important de ressources mises en jeu, nous ne cherchons pas à décrire le comportement au niveau de ces ressources mais plutôt au niveau des processus traduisant ainsi un niveau macroscopique qui permet d'obtenir une vision du fonctionnement globale et tendancielle de la CL. Un tel modèle ne s'intéresse pas au comportement individuel de chacun des produits au sein de la CL, mais plutôt à leur évolution moyenne. Il s'inspire principalement des phénomènes physiques d'écoulement des fluides. Dans ce cas, le

cheminement des produits est considéré comme l'écoulement d'un flux continu décrit par son débit instantané. Le détail des différentes étapes concernant ce flux, décrit au niveau des opérations, n'est pas considéré et seul son comportement global, décrit au niveau des processus, est modélisé. En conséquence, ce modèle apporte aux décideurs responsables de la CL une lisibilité en terme d'analyse des interactions et donne une vision globale plus claire de l'état de la chaîne facilitant ainsi toute mesure d'exploitation, que ce soit au niveau stratégique, tactique ou un certain niveau opérationnel (toute mesure d'exploitation en temps réel ne convient pas pour ce type de modélisation macroscopique).

2.2 Nature de la modélisation retenue

L'aspect macroscopique de l'approche de modélisation de la CL que nous allons proposer, nous a orientés vers l'utilisation de l'approche de modélisation par simulation et plus particulièrement vers l'utilisation de la simulation continue vu que la simulation à événements discrets dans ce contexte est souvent limitée par le problème d'explosion combinatoire du nombre d'états. L'intérêt de cette approche est évident lorsqu'il s'agit de modéliser un processus continu dont la représentation reste très proche du fonctionnement réel. En revanche, lorsqu'il s'agit d'un processus dont l'évolution est discrète, l'approche continue donne nécessairement une approximation continue du fonctionnement réel[2] dont l'information prépondérante est la dynamique du flux qui traverse ce processus. En effet, dans ce contexte, les produits circulant au niveau des processus ne se perçoivent plus individuellement mais plutôt comme un flux continu. Ainsi, une CL peut être modélisée par cette approche continue à travers la description du comportement dynamique des différents flux transitant par cette chaîne. Toutefois, vu la complexité et la grande diversité de la CL, nous procédons à cette modélisation par une démarche modulaire et générique fondée sur les RdPCV tout en introduisant des concepts issus de l'approche systémique [Le Moigne, 1994] (cf. figure III.1). Ces derniers concepts permettent de dissocier les différents aspects (physique, informationnel, décisionnel) de la CL afin de faciliter leur intégration dans le même modèle. Quant à l'utilisation des RdPCV dans ce contexte, elle permet de révéler, à travers leur représentation graphique et mathématique, les caractéristiques importantes d'une CL.

[2] Généralement cette approximation continue est suffisante lorsqu'il s'agit d'une vision macroscopique dont les entrées et sorties d'un processus peuvent être facilement considérées comme continues [Ruiz Usano et al., 1997 ; Kouikoglou et Phillis, 1997].

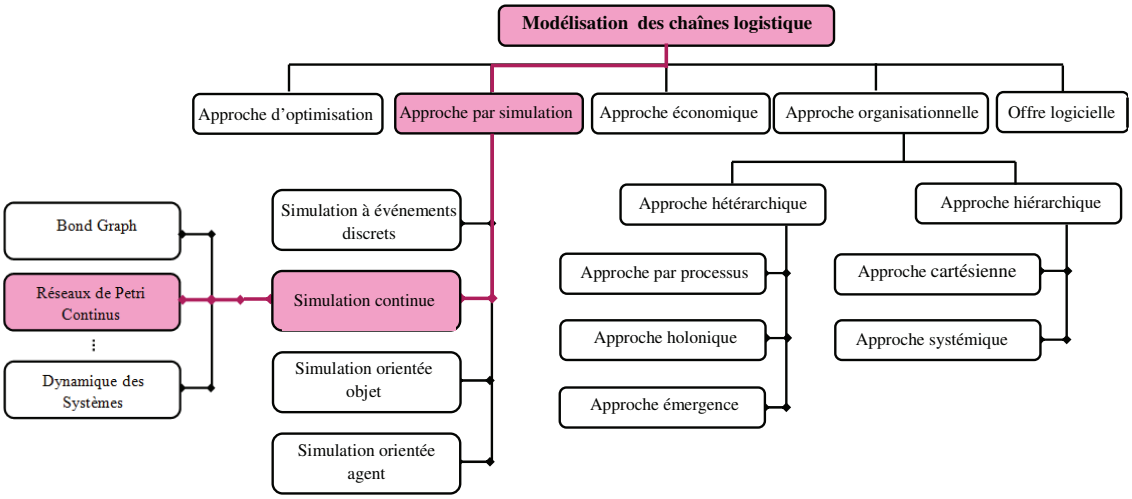


Figure III.1 *Positionnement de l'approche de modélisation retenue par rapport aux nombreux travaux de recherche dans le domaine.*

2.3 Finalité de la modélisation retenue

En résumé, afin d'appréhender la complexité de la CL, nous proposons un modèle de simulation macroscopique continu et dynamique permettant d'intégrer à la fois, dans une même structure, l'aspect physique, informationnel et décisionnel de cette chaîne logistique tout en procédant par une démarche modulaire et générique. Un tel modèle permet d'aborder les principaux aspects du SCM. Toutefois, dans le cadre de cette thèse nous nous focalisons sur les aspects les plus importants, il s'agit :

- D'appréhender la CL sous ses différents aspects, qu'ils soient structurels, organisationnels, fonctionnels, comportementaux, informationnels et décisionnels ;
- D'analyser le comportement et le fonctionnement de la chaîne d'un point de vue dynamique ;
- D'évaluer la performance de la chaîne par l'utilisation du système d'indicateurs mis en œuvre à travers le modèle ;

Après avoir délimité le contexte et le périmètre de l'approche de modélisation que nous allons proposer, nous donnerons ici une description rapide des principes de base de l'outil RdPCV utilisé dans cette proposition ; ainsi nous détaillerons les arguments qui nous ont amenés à estimer que cet outil pourrait être adapté à la représentation de la CL.

3. INTRODUCTION A LA MODELISATION PAR RdPCV

Un RdP est connu comme étant un outil de modélisation graphique et mathématique [Murata et al., 1986] permettant de révéler des caractéristiques importantes d'un système concernant sa structure et son comportement dynamique. La diversité des informations à considérer et l'hétérogénéité des comportements à intégrer pour certains systèmes ont amené

les chercheurs à enrichir et améliorer le travail qui a été fait par Carl Adam Petri, pour aboutir aujourd'hui à un large éventail d'extensions du modèle RdP où chaque extension apporte un élément de réponse à tel ou tel aspect de la complexité des systèmes étudiés [Ounnar, 1999]. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à l'extension de RdP Continu [David et Alla, 1987]. Le RdP Continu (RdPC) permet l'analyse des performances en terme de flux (débit) et il est très utile lorsque la taille du système est assez grande afin d'éviter le problème d'explosion combinatoire du nombre d'états.

Dans ce qui suit, nous présenterons brièvement les principes de base de RdP et plus particulièrement l'extension de RdPC. Nous nous limiterons ici à une présentation des notions générales. Nous invitons le lecteur intéressé par plus de détails à se reporter aux nombreux ouvrages de référence sur les RdPs (particulièrement [David et Alla, 1992]).

3.1 Concepts de base de la modélisation par RdP

3.1.1 Représentation d'un RdP

Un Réseau de Petri (RdP) est un graphe orienté comprenant deux types de nœuds, les places et les transitions qui sont reliés par des arcs orientés. Un poids (nombre entier strictement positif) est affecté à chaque arc, le RdP est dit ordinaire si les valeurs de tous ses poids valent 1, et il est dit généralisé dans le cas contraire.

A un instant donné, une place contient un certain nombre de jetons (ou marques) qui évoluent en fonction du temps. Ainsi, ce nombre indique la valeur de la variable d'état à cet instant. Le nombre de jetons dans une place peut s'interpréter par exemple comme le nombre de ressources disponibles. Le vecteur du nombre de jetons dans chaque place constitue le marquage du RdP qui traduit l'état global du système. On appelle ce marquage à l'instant ($t = 0$), le marquage initial M_0.

Graphiquement un RdP est constitué de ***:***

- Places qui sont illustrées par des cercles ;
- Transitions qui sont illustrées par des rectangles (barres) ou traits ;
- Arcs qui sont illustrés par des flèches qui joignent les cercles aux traits ou les traits aux cercles ;
- Marquage qui est traduit par une distribution de marques (ou jetons) dans les places, symbolisés par des points gras (cf. figure III.2).

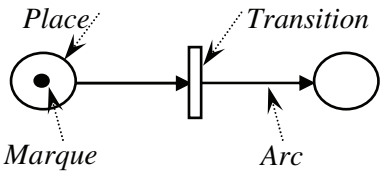


Figure III.2. *Représentation d'un RdP.*

Mathématiquement un RdP se définit par la paire $\langle N, M_0 \rangle$, avec $N = \langle P, T, Pré, Post \rangle$ où :

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ est un ensemble fini de *n* places.
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ est un ensemble fini de *m* transitions, les ensembles P et T sont disjoints.
- Pré : $P \times T \rightarrow \mathcal{N}$ est la fonction de pré-incidence tel que $Pré(P_i, T_j)$ est le poids de l'arc dirigé de P_i vers T_j.
- Post : $P \times T \rightarrow \mathcal{N}$ est la fonction de post-incidence tel que $Post(P_i, T_j)$ est le poids de l'arc dirigé de T_j vers P_i.
- M_0 est le vecteur de marquage initial dans lequel chaque place du RdP peut contenir *k* jetons ($k \in \mathcal{N}$, $\mathcal{N}$ est l'ensemble des nombres naturels).

3.1.2 Evolution d'un RdP

L'évolution d'un RdP correspond à l'évolution de son marquage au cours du temps : il se produit par des franchissements (ou des tirs) des transitions qui s'interprètent par exemple comme la consommation/production de ressources déclenchées par des événements ou des actions. Pour qu'une transition soit franchie, elle doit être validée. Une transition est dite validée si toutes les places en amont de celle-ci possèdent au moins une marque (cas d'un RdP ordinaire). Cela veut dire que les conditions nécessaires à son franchissement sont effectivement réunies : l'action et /ou l'événement associé à la transition sont alors possibles.
Une transition T_j est validée si et seulement si

$$m(P_i) \geq Pré\,(P_i, T_j) \text{ pour tout } P_i \in {}^{\bullet}T_j \qquad \text{(III.1)}$$

où $m(P_i)$ représente le nombre de jetons dans la place P_i, $i = 1 \dots n$,
${}^{\bullet}T_j$ représente l'ensemble des places en amont de la transition T_j.

Si la transition est validée, on peut effectuer le franchissement de cette transition : on dit alors que la transition est franchissable. Le franchissement consiste à :

- Retirer $Pré(P_i, T_j)$ jetons de toute place $P_i \in {}^{\bullet}T_j$.

- Ajouter $Post(P_i, T_j)$ jetons à toute place $P_i \in {}^{\bullet}T_j$.

L'évolution du RdP se fait par le franchissement d'une seule transition à la fois. Quand plusieurs transitions sont simultanément franchissables, on ne peut pas savoir dans quel ordre elles seront effectivement franchies car l'évolution n'est pas unique.

3.1.3 Equation fondamentale

Une séquence de franchissement S est caractérisée par un vecteur noté $\bar{S}$. C'est un vecteur de dimension m (nombre de transitions du RdP) dont la $i^{ième}$ composante représente le nombre d'occurrences de la $i^{ième}$ transition dans la séquence S.

Le marquage M obtenu après le franchissement d'une séquence S est donné par l'équation d'état suivante :

$$M = M_0 + W.\bar{S} \qquad \text{(III.2)}$$

dans laquelle :

M_0 est le marquage initial ;

W est la matrice d'incidence, de dimension $n \times m$ éléments, définie par :

$$W = [w_{ij}] = [w_{ij}^{+} - w_{ij}^{-}] = Post(P_i, T_j) - Pré(P_i, T_j), (i = 1 \dots n, j = 1 \dots m) \qquad \text{(III.3)}$$

$\bar{S}$ est le vecteur caractéristique de la séquence S.

M est le marquage atteint (ou accessible) en franchissant S à partir de M_0 .

3.2 Différentes extensions de RdP

La diversité des extensions des réseaux de Petri a fait de cet outil un langage polyvalent avec lequel des systèmes complexes peuvent être modélisés. C'est pour tenter de modéliser des comportements plus complexes que différentes extensions du modèle RdP ont été proposées : RdP temporisés [Chretienne, 1983], RdP continus [David et Alla, 1987], RdP stochastiques [Natkin, 1980 ; Haddad et Moreaux, 2001], RdP hybrides [Le Bail et al., 1991], RdP lots [Demongodin, 1994], RdP colorés [Jensen, 1992], etc. Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement aux RdP Continus (RdPCs).

3.2.1 Les RdPs temporisés

Les RdPs ordinaires permettent de modéliser le cours d'une opération mais ils n'expriment pas l'information "durée" de cette opération. Il est possible de représenter cette notion de temps grâce aux RdPs temporisés qui permettent non seulement de dire ce qui se passe, mais quand ça se passe.

Pour cela, des durées peuvent être associées à chaque place d'un RdP. On parle alors de RdP P-temporisés. Ces durées peuvent également être associées à chaque transition d'un RdP, on parlera alors de RdP T-temporisés.

Un RdP T-temporisé est défini par le couple $\langle R, Tempo \rangle$ où R est un RdP non marqué et $Tempo$ une application telle: $Tempo(T_j) = d_j =$ durée associée à T_j (d_j rationnel positif ou nul).

3.2.2 Les réseaux de Petri continus (RdPCs)

Lorsque les dynamiques d'un système physique sont nombreuses, sa modélisation par un réseau de Petri discret (RdPD) (ordinaire ou temporisé) est décrite par un nombre important de marques. Il s'ensuit un nombre important des marquages accessibles. C'est pour éviter l'explosion combinatoire du nombre d'états accessibles que les RdPCs ont été introduits par [David et Alla, 1987] comme une limite des RdPDs, obtenus à partir de ces derniers en fluidifiant les marques. Cette extension du RdP permet d'élargir le cadre des RdPs aux systèmes qui ne sont pas modélisables par des RdPD (tels que l'écoulement d'un fluide dans un réservoir, la production des produits par lot) [David et Alla, 1992].

Un RdPC est un doublet $\langle Q, X_{max} \rangle$ tel que :

- Q est un RdP généralisé marqué.

- X_{max} est un vecteur constitué des vitesses (fréquences) de franchissement maximales des transitions du réseau comme suit :

$X_{max} = (x_{max\,j})_{j=1\ldots p} \in \{\mathcal{R}^+\}^p$. ($\mathcal{R}^+$ représente l'ensemble des réels non négatifs).

Contrairement aux RdPDs, le nombre de marques dans les RdPCs est un réel non négatif. Une transition est considérée sensibilisée dès que le marquage des places en amont est strictement non nul :

$$\forall P_i \in {}^{\bullet}T_j, \quad \frac{m_i}{Pr\grave{e}(P_i,T_j)} > 0 \qquad \text{(III.4)}$$

de façon plus formelle, le degré de validation d'une transition T_j continue est donnée par :

$$q = \left[min_{p \in {}^{\bullet}t} \left\{ \frac{m[p]}{pr\acute{e}[p,t]} \right\} \right] \qquad \text{(III.5)}$$

Le franchissement s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse traduite par le nombre de marques franchies pendant une unité de temps.

Le franchissement d'une transition dans les RdPCs suit dans le cas général la loi régissant la dynamique du système étudié. Une transition continue avec une place d'entrée

continue et une place de sortie continue, est l'image exacte du sablier. Le jeton s'écoule continûment de la place d'entrée vers la place de sortie.

L'équation fondamentale des RdPDs définie par (III.2), devient pour les RdPCs :

$$\frac{dM(t)}{dt} = W.X(t) \qquad \text{(III.6)}$$

M représente le vecteur de marquage du RdPC,

W représente la matrice d'incidence (matrice décrivant la structure du réseau),

$X(t)$ représente le vecteur des vitesses de franchissement des transitions en cours de franchissement à l'instant *t*.

Plusieurs extensions de RdPC ont été définies, elles sont différenciées par la façon de calculer les vitesses de franchissement des transitions $X(t)$: à vitesses constantes [David et Alla, 1992] (ou la sémantique serveur fini [Recalde et Silva, 2001]), à vitesses variables [David et Alla, 1992] (ou la sémantique serveur infini [Recalde et Silva, 2001]), Asymptotique [Le Bail et al., 1993] et à Vitesses Fonction du Temps [Dubois et al., 1994].

Dans ce qui suit les RdPCs à vitesse Variable (RdPCV) seront présentés en détail car ce sont ceux-là qui nous intéressent dans nos travaux de recherche, les autres modèles seront brièvement présentés.

3.2.2.1 Le modèle RdP Continu à Vitesses Constantes (RdPCC)

Dans ce modèle, la vitesse maximale X_i associée à une transition T_i est constante, et la vitesse de franchissement de cette transition est égale à sa vitesse maximale [David et Alla, 1992] (figure III.3).

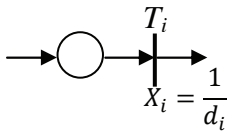


Figure III.3 *Station (stock+machine) avec vitesse de franchissement constante (RdPCC).*

L'expression de X_i, mesurée en produits par unité de temps est la suivante :

$$X_i = \mu_i.1 = \frac{1}{d_i} \qquad \text{(III.7)}$$

μ_i représente la fréquence de franchissement et d_i représente la temporisation associée à la transition T_i.

L'approximation continue de ce modèle ne donne pas toujours les paramètres moyens du système, sauf si le système est saturé (lorsque l'augmentation du nombre de marques dans le RdP discret correspondant n'augmente pas les fréquences de franchissement en régime stationnaire).

3.2.2.2 Le modèle RdP Continu à Vitesses Variables (RdPCV)

Dans ce modèle, la vitesse maximale X_i associée à une transition dépend du marquage m_i des places en amont de la transition et d'une valeur constante μ_i associée à la transition. Les marquages et les vitesses sont donc des fonctions continues du temps, alors que dans le RdPCC cette propriété est vraie pour les marquages mais pas pour les vitesses qui sont simplement constantes par morceaux [David et Alla, 1989]. Ce modèle RdPCV fournit une meilleure approximation du RdP discret, en particulier lorsque le nombre de marques est petit, mais les simulations sont plus longues. Nous avons alors l'expression suivante pour la vitesse maximale de franchissement de la transition (cf. figure III.4).

$$X_i = \mu_i . min\ (\alpha, m_i) \tag{III.8}$$

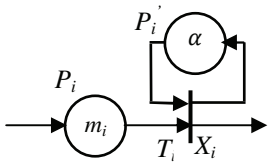


Figure III.4 *Station (stock+machine) avec vitesse de franchissement variable (RdPCV).*

μ_i est la fréquence de franchissement.

α (réel positif) est le nombre de produits pouvant franchir simultanément la transition T_i.

m_i est le marquage de la place P_i.

Dans le cas où la transition T_i est précédée de j places en amont, l'expression de la vitesse X_i est alors la suivante :

$$X_i = \mu_i . \min\ (\alpha, m_1, \dots, m_j) \tag{III.9}$$

$m_1, \dots, m_j$ sont les marquages de toutes les places en amont de la transition T_i.

Cette équation est caractérisée par des dynamiques non linéaires dues à l'opérateur *minimum* et par conséquent elle est parfois difficile à exploiter. Pour cerner ces difficultés, certains auteurs ont introduit la théorie de la logique floue permettant d'aboutir à des modèles linéaires [Hennequin, 2000].

3.2.2.3 Le modèle RdPC Asymptotique

Il est possible de distinguer plusieurs phases d'évolution du marquage. Chaque phase est caractérisée par une période durant laquelle le vecteur des vitesses de franchissement est constant. La vitesse de franchissement d'une transition est alors constante par morceaux, et l'évolution du marquage est donc composée de plusieurs phases de fonctionnement. Il s'agit de l'approximation du RdP Continu à Vitesses Variables, mais la simulation est facilitée [Le Bail et al., 1993].

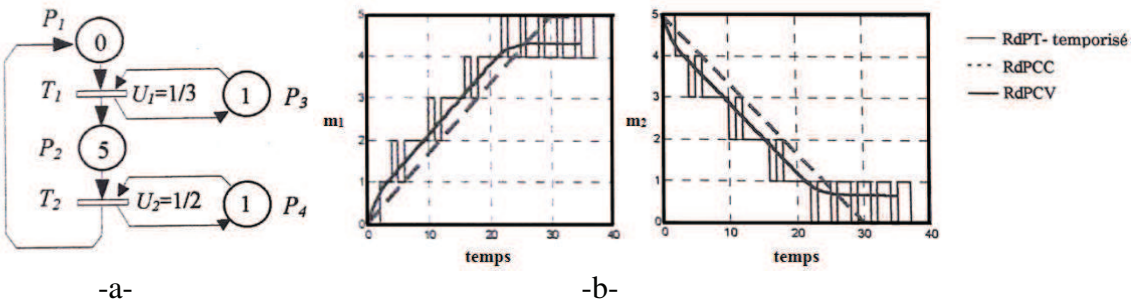
3.2.2.4 Le modèle RdPC à Vitesses Fonction du Temps

Cette extension des RdP continus temporisés permet de prendre en compte l'environnement du système modélisé comme par exemple la fluctuation de l'approvisionnement d'un atelier ou l'influence d'une commande extérieure. La vitesse maximale de franchissement d'une transition est soit une fonction continue du temps, soit une fonction constante par morceaux. La vitesse de franchissement, à un instant donné, est déterminée par une relation identique à celle du RdP continu temporisé, avec comme seule différence une vitesse maximale fonction du temps [Dubois et al., 1994]. Dans le cas de vitesses constantes par paliers, le RdP obtenu peut être vu comme une suite de RdPCC.

3.2.3 Synthèse sur le choix des RdPCV

La raison qui a conduit à l'introduction des RdPCs, définit implicitement leur domaine d'utilisation. Les RdPCVs permettent de modéliser par approximation continue des systèmes à événement discrets opérant sur des flux plutôt que sur des entités discrètes. Ils trouvent une application particulièrement intéressante pour la recherche des flux caractérisant un régime stationnaire. Bien que l'application la plus courante des RdPCVs reste dans le domaine de la modélisation des systèmes de production, ces modèles constituent des outils de modélisation et d'analyse de performance fort intéressants pour une large classe de processus chimiques ou aussi de processus biologiques [Alla et David, 1988 ; Le Bail, 1988 ; Amer Yahia et al., 1997].

Dans [Zerhouni, 1991], la qualité de l'approximation continue a été évaluée par l'estimation de l'écart entre le marquage du RdPCV et celui du RdPT-temporisé. Le RdPT-temporisé étant le modèle qui correspond à l'évolution réelle du système, sert de référence. Il a été montré que cet écart dépend fortement de la configuration du réseau. Son évaluation est faite à partir des expressions analytiques des marquages continus et discrets, dans différents cas de structure représentant des lignes de fabrication.



-a- -b-

Figure III.5 *Exemple de RdP et la superposition du son marquage continu et discret (RdPT-temporisé/RdPCC/RdPCV.*

Prenons l'exemple du RdP ordinaire de la figure III.5-a-, on constate à travers les graphes de simulation (cf. figure III.5–b-) que l'évolution du marquage continu du RdPCV est plus proche de celle du marquage discret (RdPT-temporisé) que l'évolution continue du RdPCC. L'inconvénient des RdPCV est souvent lié aux résolutions successives de systèmes d'équations différentielles qui ralentissent considérablement les calculs, mais les limites de calcul sont de plus en plus repoussées grâce à la puissance et la rapidité croissantes des calculateurs numériques. En passant outre les problèmes numériques, l'écriture sous forme d'équations différentielles nous permet une étude analytique plus aisée des systèmes.

A cet égard, le RdPCV peut contribuer d'une manière significative à la modélisation des systèmes complexes à grande échelle tels que la CL. Dans la section suivante, nous présentons les principaux apports de cet outil pour la CL.

4. APPORTS DE L'OUTIL RDPCV DANS L'ETUDE DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Le RdPCV possède des qualités d'analyse indéniables de par son formalisme et il semble bien adapté à la modélisation et à l'analyse de la CL pour les raisons suivantes :

- Son ***aspect graphique*** qui est d'une aide précieuse dans la représentation des différents phénomènes dans la CL. En effet, RdPCV offrant un support graphique naturel permet de visualiser d'une manière naturelle les différents processus dans la CL (stockage, transformation, transport,...), d'analyser graphiquement leurs propriétés et, par conséquent, de valider facilement leurs spécifications. Une telle représentation graphique permet une appréhension globale immédiate facilitant la perception de ces processus dans leur globalité et apportant une lisibilité en termes d'analyse des interactions.

- Son ***aspect formel*** qui fournit une loi mathématique de construction de l'espace d'état du système. Cette formulation analytique, à travers une mise en équations différentielles, donne ainsi l'accès à de nombreuses possibilités, telles que la reproduction du comportement dynamique, l'évaluation de performance, ou encore l'élaboration des stratégies de pilotage du flux. Cet aspect formel du RdPCV associé à son caractère graphique permet souvent une évaluation simple du comportement du système. En outre, RdPCV se prête à la simulation lorsque le système modélisé est trop complexe pour autoriser une étude analytique [Proth et al., 1994].

- Son ***caractère flexible*** qui offre la possibilité d'évoluer progressivement vers une granularité de plus en plus fine, selon les hypothèses consenties en regard des objectifs

de modélisation [Balduzzi et al., 2001 ; Jiménez Macías et Pérez de la Parte, 2004]. En ce sens, cette flexibilité de modélisation permet de rechercher le modèle de la CL correspondant au niveau de décision visé (stratégique, tactique ou opérationnel) ;

- Son ***caractère modulaire*** qui consiste à modéliser de manière séparée chaque processus (ou acteur) dans la CL par un bloc d'éléments RdPCV puis à construire le modèle complet de la chaîne en connectant les différents blocs.

- Sa ***formulation agrégée*** permettant la fluidification des phénomènes discrets (événementiels). En effet, l'étude des systèmes à événements discrets nécessite une description très fine des phénomènes et des lois très précises qui traduisent leur fonctionnement [Sweetser, 1999]. Dans le cas de la CL où la taille est très grande, l'analyse via des modèles à événements discrets devient difficile ou même impossible [Robinson, 2005]. Dans cette situation, l'utilisation du RdPCV permettant une approximation continue des phénomènes est intéressante. A cet égard, RdPCV considère les transferts de produits comme des flux et remplace, par conséquent, les variables discrètes par des variables continues. Ce qui permet de pallier les problèmes d'explosion combinatoire inhérents au grand nombre d'états à considérer pour la CL.
- Son ***efficacité*** et sa ***simplicité*** dans la synthèse des stratégies de pilotage. De telles caractéristiques sont liées, d'un côté, au pouvoir de RdPCV à tenir compte des contraintes de capacité des ressources, en considérant leurs taux de traitement et les paramètres du système en considérant leurs approximations continues [Suri and Fu, 1994] et d'un autre côté, à la possibilité de modéliser, via une approximation continue, la dynamique des flux sous forme d'équations différentielles plus faciles à résoudre [Gershwin, 2000].

- Son ***lien établi avec l'automatique continue*** dont la théorie a connu de larges investigations. Ce lien est établi à travers des équations différentielles régissant l'évolution du modèle RdPCV. Ces équations remplacent l'étude de type événement par événement par une étude de variation moyenne. L'obtention de telles équations à travers le modèle RdPCV de la CL constitue une passerelle entre cette dernière et les systèmes continus très largement étudiés. Ce qui permet d'étudier la CL comme un système continu en bénéficiant d'un corpus théorique complet**.**

- Sa ***meilleure qualité d'approximation*** par rapport aux d'autres extensions de RdPC. En effet, les RdPCV donnent des résultats satisfaisants même quand le système n'est pas saturé, c'est-à-dire lorsque des petites quantités de produits circulent dans le

système [David et Alla, 1992]. Nous entendons par résultats satisfaisants le fait que l'approximation continue qui est faite par cet outil donne une évolution très proche de celle obtenue en modélisant le même système avec un RdPD. Cela veut également dire que les RdPCV proposent une bonne approximation continue lorsqu'ils modélisent la CL , qui est à l'origine de nature discrète, et cela sans hypothèse restrictive au niveau du nombre de produits qui circulent dans cette dernière.

5. MODELISATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE PAR LES RdPCVs

L'analyse systémique permet d'appréhender la CL comme un système complexe. Ce système fonctionne selon une logique de réseaux, composés de nœuds interconnectés par des arcs. Les nœuds représentent les différents acteurs de la CL (les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs, les détaillants et les consommateurs) qui sont caractérisés par des processus précisant leurs fonctions principales dans la CL. Quant aux arcs, ils relient les nœuds (les acteurs) à différentes échelles géographiques (locale, régionale, nationale, continentale et intercontinentale), représentant ainsi les vecteurs de transports et d'échanges informationnels [Duong et al., 2012] (cf. figure III.6).

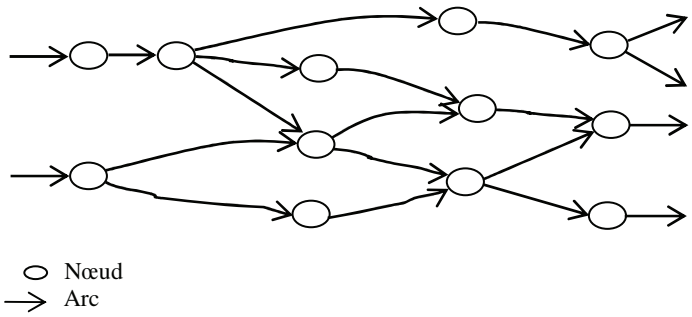


Figure III.6 *Illustration systémique de la chaîne logistique sous forme d'un réseau.*

Vu la difficulté de modélisation de tel système due d'un côté à la spécificité et à la complexité dynamique du système même [Vernadat, 1996] et d'un autre côté, au nombre des aspects (physique, informationnel, décisionnel) qui doivent être pris en compte dans ce cadre, nous proposons une approche modulaire fondée sur les RdPCV pour la modélisation des nœuds et des arcs de la CL, tout en nous efforçant de définir des concepts suffisamment génériques pour qu'ils puissent s'adapter à la grande diversité de configuration des CLs. Le modèle global RdPCV de la CL décrivant le comportement de l'écoulement du flux de produits, peut être ainsi obtenu intuitivement par l'assemblage systématique des différents modèles élémentaires RdPCVs associés aux nœuds et aux arcs. Cet assemblage systématique des différents modèles élémentaires (modules), de manière à modéliser la CL à étudier, prouve l'intérêt de cette approche modulaire et générique. Le gain en souplesse de

modélisation se trouve également renforcé par cette association « modularité-généricité » [Pérès et al., 2007]. Ainsi, tout changement de politiques de pilotage, de mécanismes de coordination ou de configuration de la CL peut être rapidement modélisé. Outre cette modularité-généricité de représentation, on peut souligner les différents attraits que peut ajouter l'outil RdP dans ce contexte, citons notamment l'aspect graphique facilitant la représentation des phénomènes et l'aspect comportemental fournissant un langage mathématique qui permet une évaluation simple et globale du comportement dynamique. En outre, les RdPs permettent la simulation lorsque le système modélisé est trop complexe pour faire une étude analytique [Proth et al., 1994].

Un tel modèle apporte à l'exploitant une vision globale plus claire de l'état de la CL en décrivant le comportement dynamique du phénomène de transfert de flux à travers les installations de cette chaîne. Ce modèle peut également être intégré au système d'aide à la décision en tant qu'instrument d'évaluation de la performance et de pilotage du flux dans la chaîne étudiée, comme nous allons voir dans la section suivante.

Nous présentons dans cette section les différents modèles élémentaires RdPCVs associés aux nœuds et aux arcs de la CL et, par conséquent, nous déduisons par simple assemblage le modèle global RdPCV de la CL.

5.1 Modèles RdPCVs des nœuds de la chaîne logistique

Voyons maintenant comment obtenir les modèles RdPCVs élémentaires décrivant les comportements dynamiques des différents nœuds (acteurs) de la CL. Nous commençons ce développement en proposant des concepts suffisamment génériques pour servir de base à la présentation de l'ensemble des acteurs de la CL et à l'instanciation d'un grand nombre de processus. Une telle démarche est nécessaire et d'une très grande importance dans la pratique, vu la diversité des acteurs dans la CL, et vu la difficulté de modélisation induite par la spécificité et la complexité de ce type de systèmes.

5.1.1 Structure générique d'un nœud dans la CL

Quoiqu'il en soit, un nœud (un acteur) de la CL est matérialisé par l'existence d'un site[3] qui est caractérisé par une filière précisant sa mission (approvisionnement, production, distribution, …etc.) au sein de la CL en termes de processus. Ces processus à leur tour traduisent la vue fonctionnelle et structurelle du site en rendant compte de l'infrastructure nécessaire au traitement des flux en termes d'opérations, de ressources et de liens d'interaction.

[3] Ensemble des installations industrielles regroupées sur un même lieu géographique [Bruniaux, 2000].

Bien que chaque site doive tenir compte du fait qu'il participe à la circulation des flux dans un réseau qui s'étend bien au-delà de ses propres limites [Eymerie, 1997], il doit nécessairement établir des contacts avec d'autres sites dans la CL. Ces contacts sont assurés par les deux types de flux ; par les flux physiques à travers les connexions de transport et par les flux d'informations à travers les liaisons d'échange d'informations : demandes et commandes[4]. Ainsi, chaque site peut établir deux types de contacts avec les autres sites dans la CL: un « contact en aval » avec un ou plusieurs sites placés dans des rangs en aval et un « contact en amont » avec un ou plusieurs sites placés dans des rangs en amont. À travers le contact en aval, le site reçoit des demandes d'expédition de produits[5] provenant d'un ou de plusieurs sites placés dans des rangs en aval. Les produits demandés sont livrés en retour à ces sites placés dans des rangs en aval. À travers le contact en amont, le site transmet ses commandes en produits à un ou à plusieurs sites placés dans des rangs en amont et ces derniers lui délivrent les produits commandés, en lui assurant ses approvisionnements (cf. figure III.7). Par conséquent, chaque acteur (nœud) dans la CL se comporte à la fois comme un client pour les acteurs de son contact en amont et comme un fournisseur pour les acteurs de son contact en aval.

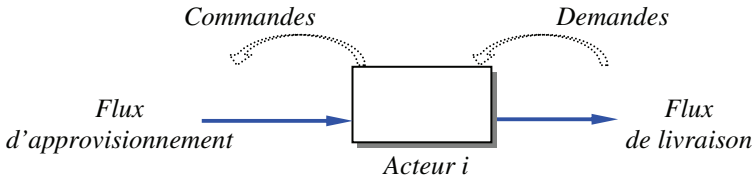


Figure III.7 *Schéma représentatif des flux d'entrée et de sortie d'un acteur dans la CL.*

Par exemple dans le cas d'une CL avec une structure en série (CL sans branche : enchaînement de nœuds en série) gérée en flux tiré, chaque acteur n'a de contact qu'avec le site placé un rang en amont et celui placé un rang en aval. L'acteur de chaque rang fonctionne ainsi comme un client pour l'acteur du rang en amont et comme un fournisseur pour l'acteur du rang en aval. A partir du besoin exprimé par le client final, un flux d'information est généré et propagé de proche en proche en remontant des commandes tout au long de la CL, jusqu'à l'acteur situé le plus en amont qui est le fournisseur de matières premières. En réponse, un flux physique est mobilisé à travers les acteurs et les connexions de transport en livrant des produits depuis le fournisseur de matières premières jusqu'au client final (cf. figure III.8).

[4] Notons ici que les commandes à passer aux acteurs fournisseurs sont considérées comme des demandes par leurs destinataires.

[5] Ces produits peuvent être à différentes étapes de fabrication : matière premières, produits semi-finis, produits finis, ...).

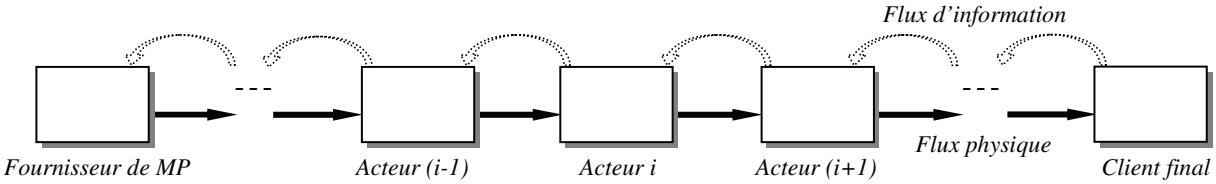


Figure III.8 *Schéma représentatif de l'interconnexion des acteurs de la chaîne logistique avec une structure en série gérée en flux tiré.*

Chaque acteur est ainsi un système ouvert sur son environnement (acteurs clients ou/ et acteurs fournisseurs) avec lequel il échange un certain nombre de flux (flux physique et flux d'information). Pour faciliter la compréhension des processus de traitement de chacun de ces flux, chaque acteur peut être considéré, selon l'approche systémique [Le Moigne, 1994], comme une composition de plusieurs sous-systèmes :

- sous-système physique (ou système opérant) qui se charge de réaliser tous les traitements concernant l'aspect physique ;
- sous-système de décision qui décide des actions à conduire sur le sous-système opérant en fonction des objectifs et des politiques de l'acteur.
- sous-système d'information qui établit le lien entre le sous-système de décision et le sous-système physique ; il informe le sous-système de décision des performances du sous-système physique, et assure la transmission des instructions du sous-système de pilotage vers le sous-système physique.

Le pilotage d'un acteur est une fonction qui permet d'exploiter les ressources qui sont à disposition dans cet acteur. Cette fonction trouve sa matérialisation dans l'association de l'information et la décision [François, 2007]. Par conséquent, l'ensemble du système de décision et du système d'information constitue le système de pilotage de l'acteur[6]. Ce dernier sert à adapter l'acteur à son environnement à travers la synchronisation des différents processus de traitement en tenant compte de tout type d'informations renseignant sur :

- les demandes des clients environnants et / ou des clients finals ;
- l'état du transport ;
- la politique et les règles de gestion adoptées par le système de pilotage ;
- l'état du système physique.

Si les deux premiers types d'informations sont externes à l'acteur et relatives à son environnement extérieur, les deux derniers sont internes à l'acteur (cf. figure III.9).

[6] Nous utilisons abusivement le terme système au lieu de celui sous-système.

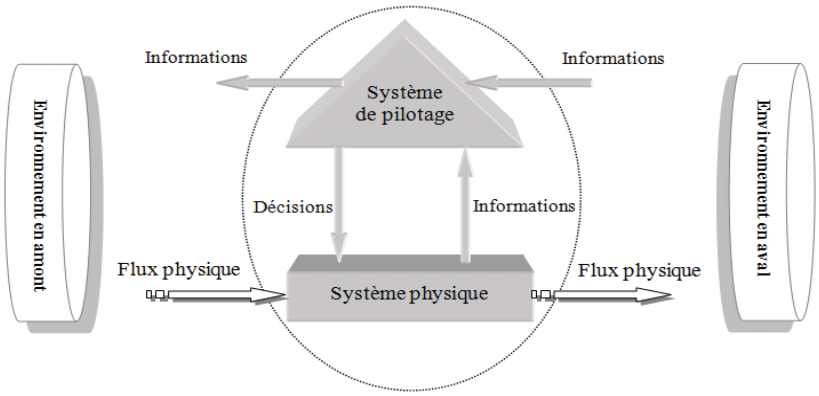


Figure III.9 *Illustration systémique de l'acteur.*

Comme nous avons déjà abordé les deux types d'informations concernant la demande et les politiques de gestion, nous nous attacherons ici à apporter une lumière sur le type d'informations concernant l'état du système physique. Nous nous rendons compte ainsi des différents types d'informations, liés aux aspects physiques du déroulement des opérations de traitement, sur lesquels se fonde le système de pilotage pour atteindre et maintenir un niveau de service objectif vis-à-vis de l'environnement de l'acteur considéré. Pour ce faire, nous décrirons la structure interne du système physique de l'acteur tout en nous limitant à désigner la disposition des ressources et à identifier les principaux processus intervenant dans le traitement du flux physique.

En effet, le système physique de l'acteur est le siège de l'activité de traitement du flux physique. Il est délimité par des vecteurs de transport qui lui assurent l'approvisionnement et la livraison du flux. Il dispose également de ses propres ressources humaines (opérateurs, ...), physiques (machines, outils, …) et techniques (méthodes, procédés, gammes, nomenclatures, …). Grâce à ces ressources, il exécute les opérations nécessaires pour atteindre les objectifs que s'est fixé le système de pilotage. En effet, à l'arrivée d'une livraison (commande) en provenance d'un fournisseur en amont, le système physique de l'acteur considéré procède au transfert et à la manutention des produits arrivant, afin de les stocker temporairement dans des emplacements dédiés. Ces produits sont ensuite transférés afin qu'ils soient traités ou manipulés, en faisant intervenir plusieurs opérations apportant des valeurs ajoutées à ces produits, à travers les modifications amenées dans leurs caractéristiques. Une fois traités, ces produits sont placés dans des stocks, avant d'être livrés et transportés chez les clients environnants de l'acteur considéré. Nous distinguons ainsi deux principaux processus formant le système physique de l'acteur. Il s'agit du processus de stockage amont et aval et du processus de traitement (manipulation) des flux physiques transitant par l'acteur (cf. figure III.10).

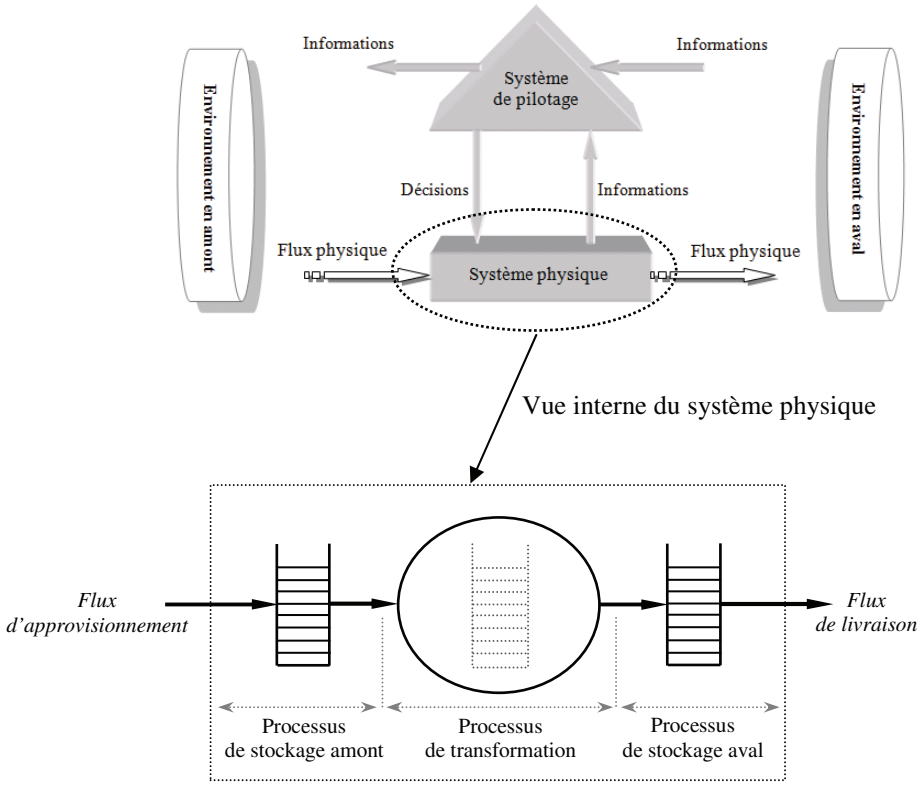


Figure III.10 *Structure interne du système physique d'un acteur.*

Si l'ensemble des opérations du processus de stockage agit sur les produits en modifiant leurs caractéristiques physiques (les coordonnées temporelles), celle du processus de traitement (manipulation) agit sur les produits en modifiant leurs aspects morpho-dimensionnels (compositions et morphologies) [Savy, 2007]. D'un point de vue systémique [Le Moigne, 1977], le processus de stockage correspond au concept de transtemporisation (apportant des changements en termes de temps) et le processus de traitement correspond au concept de transformation (apportant des changements en termes de forme [Le Moigne, 1977]), mais il peut correspondre aussi au concept de transmutation (apportant des changements en termes de nature [Le Gallou, 1992]). Afin d'éviter toute ambiguïté, nous considérerons ici qu'un concept de transformation désigne tout changement en termes de forme et / ou de nature. Par conséquent, nous utiliserons ici le terme « processus de transformation » au lieu de celui de « processus de traitement ».

Le processus de stockage permet à l'acteur de faire face aux différentes sources de fluctuation (absorber les aléas, réguler le traitement, …etc.), en disposant de deux types de stocks:

- stock amont dans lequel sont déposés les produits approvisionnés en provenance des acteurs amont en attendant leur transformation ;

- et stock aval dans lequel sont déposés les produits issus d'un processus de transformation et à partir duquel les demandes des acteurs aval vont être servies.

Ces stocks sont généralement caractérisés par leur capacité limitée et leur cadence maximale de mise à disposition pour le traitement ou la livraison.

Le processus de transformation se charge de la fonction principale de l'acteur, qui consiste à amener des modifications dans les caractéristiques du flux de produits pour atteindre, au final, les valeurs attendues par les clients du contact aval de l'acteur considéré. En effet, dans ce processus le flux de produits transite au travers d'un ensemble de ressources élémentaires en interaction, structurées souvent en parallèle et en série, matérialisant un ensemble d'opérations liées entre elles par des enchaînements techniques et temporels. Ces opérations sont chargées, dans leur globalité, de transformer le flux de produits en agissant au cours du temps sur les caractéristiques des produits en termes de forme et /ou de substance. Bien qu'il puisse exister parmi ces opérations celles qui n'agissent pas forcément de la même manière « machines de production reliées par des zones de stockage et des moyens de transfert », toutefois nous ne nous occupons pas ici des phénomènes internes. En effet, nous ne cherchons pas à entrer dans un détail qui ne serait pas pertinent par rapport à notre objectif de définir une structure générique suffisamment flexible pour intégrer les spécificités de tout acteur dans la CL. Pour nous, c'est comme si les produits rentrent dans une zone, subissent une transformation et ressortent au bout d'un certain temps. La capacité globale de traitement du processus de transformation dépend des capacités de chaque ressource et surtout de l'organisation associée à ces ressources (ressources en série, en parallèle, mixte, etc.) [Bruniaux, 2000].

Nous pouvons assimiler la mobilité des produits à travers les différents processus au niveau du système physique de l'acteur à un écoulement de fluides dans un système à trois réservoirs A, B et C comme illustré dans la figure III.11.

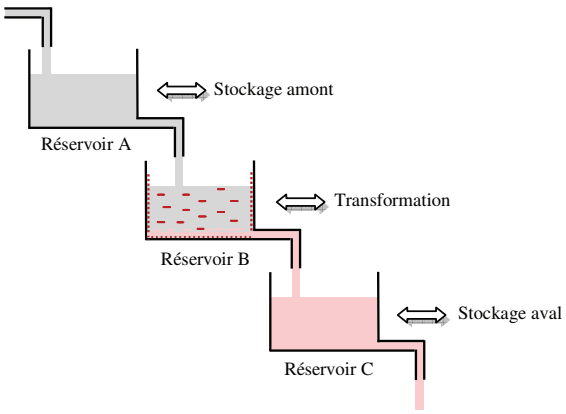


Figure III.11 *Assimilation de la mobilité des produits à travers le système physique d'un acteur à un écoulement de fluides dans un système à réservoirs.*

Les quantités de produits dans les stocks amont et aval correspondent respectivement aux volumes de liquide dans les réservoirs A et C. Quant aux en-cours de transformation, ils correspondent au volume de liquide sous traitement dans le réservoir B. Alors que le transfert des produits d'un processus à l'autre correspond à l'écoulement du liquide d'un réservoir à l'autre à travers les conduites (ou les orifices) caractérisées par leur débit.

Cette description structurelle du système physique est commune à tous les acteurs quelles que soient leurs politiques de gestion adoptées. L'état instantané du système physique d'un acteur est donné par l'ensemble des états de ses processus de stockage et de transformation à cet instant [Borne et al., 1992]. La connaissance de l'état de chaque processus est possible à travers ses variables d'état[7] caractérisant son comportement dynamique. L'état du processus de stockage amont est décrit à travers une variable d'état représentant le niveau du stock amont. Cette variable traduit ainsi la quantité instantanée[8] de produits stockés pour des fins de transformation. Quant à l'état du processus de transformation, il est décrit à travers une variable d'état représentant les en-cours de transformation. Cette variable traduit la quantité instantanée de produits en cours de transformation. Par conséquent, les en-cours de transformation sont des produits considérés comme étant sortis du stock amont et non encore rentrés dans le stock aval. Ainsi, l'ensemble des produits présents dans le processus de transformation, qu'ils soient en attente devant une ressource, en transfert d'une ressource vers une autre, ou en transformation sur une ressource, est considéré comme de l'en-cours. Enfin, l'état du processus de stockage aval est décrit à travers une variable d'état représentant le niveau du stock aval. Cette variable traduit ainsi la quantité instantanée de produits stockés temporairement après leur transformation en attendant leur livraison. La connaissance à chaque instant de ces variables décrivant l'état du système physique de l'acteur constitue, comme nous l'avons déjà vu, l'une des informations nécessaires sur lesquelles se fonde le système de pilotage pour prendre une décision. En effet pour chaque acteur, en fonction de l'état de son système physique (niveau du stock amont, en-cours de transformation, niveau du stock aval), de l'état de son transport en aval, des demandes de ses clients environnants et des politiques de pilotage adoptées, son système de pilotage génère un plan d'action autour de trois principaux engagements :

- engagement de transformation à travers le déclenchement du processus de transformation en activant les opérations des différentes ressources au niveau du système physique ;

[7] Paramètres mesurables qui rendent compte de l'état du système.
[8] C'est la quantité à un instant donné.

- engagement de livraison à travers l'autorisation du transfert du flux de produits transformés vers les acteurs clients ;
- engagement de réapprovisionnement à travers la transmission des commandes (ordres d'achat de produits) aux acteurs fournisseurs.

Ce cadre architecturel propre à tous les acteurs de la CL, montre bien que ces acteurs ont une structure comparable, même s'ils s'articulent différemment et génèrent des flux de volumes et de fréquences différents. La figure III.12 illustre ce cadre architecturel de chaque acteur de la CL.

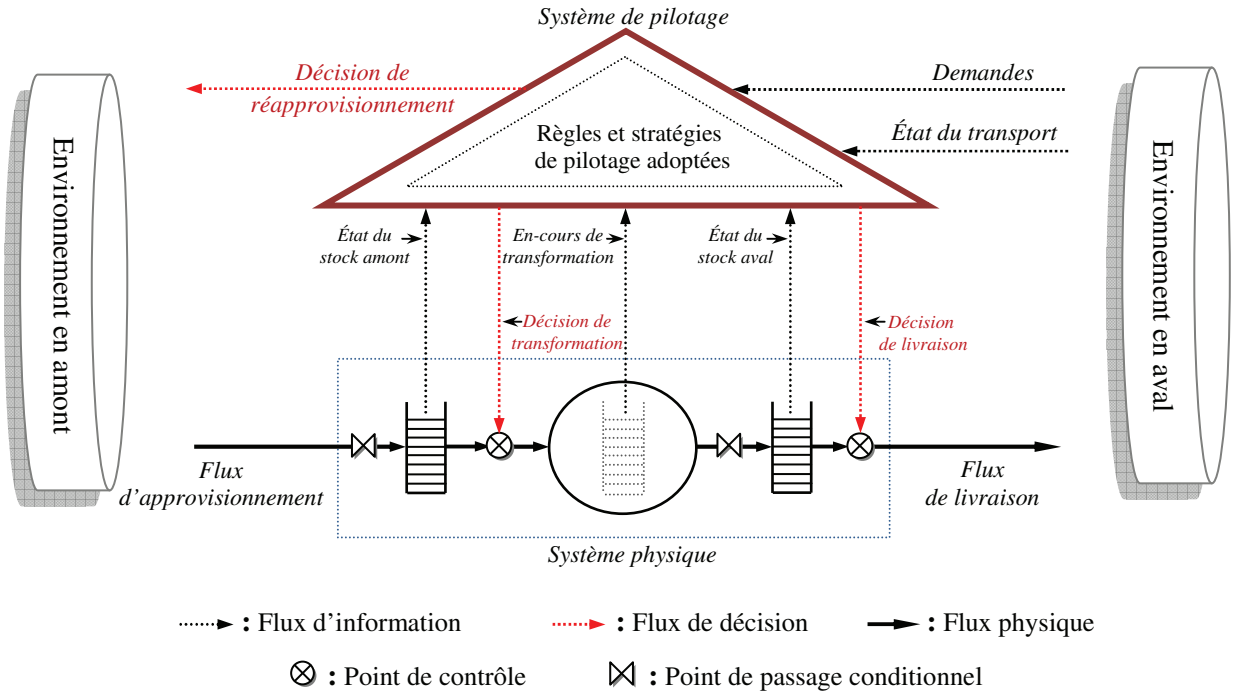


Figure III.12 *Structure générique d'un acteur dans la CL.*

Notons ici que les commandes à passer aux acteurs fournisseurs sont des décisions prises par le système de pilotage de l'acteur considéré, toutefois elles sont considérées comme des informations par leurs destinataires. Nous faisons la distinction ici aussi entre les points de contrôle et les points de passage conditionnel au niveau du système physique de l'acteur. En effet, les points de contrôle sont les points de pénétration des décisions ; points à partir desquels les opérations sont déclenchées par les décisions prises par le système de pilotage. Quant aux points de passage conditionnel, ce sont les points à partir desquels le passage d'un flux de produits est conditionné par les capacités d'accueil des stocks recevant ce flux. Par conséquent, le système de pilotage n'a aucune décision à prendre au niveau de ces points de passage.

5.1.2 Modèle RdPCV d'un acteur de la CL

Après avoir décrit l'acteur dans la CL d'un point de vue structurel, nous allons maintenant nous intéresser à l'obtention d'un modèle RdPCV qui le représente. Ce dernier est élaboré selon le cadre architecturel générique que nous venons de développer. Un tel modèle doit décrire le comportement dynamique des flux circulant dans l'acteur ainsi que l'interaction de ce dernier avec son environnement (ses contacts amont et aval). Autrement dit, le modèle RdPCV de l'acteur doit expliciter :

- l'organisation des différents processus au niveau du système physique ;
- l'ensemble des informations émises en direction du système de pilotage[9] ;
- les principaux engagements de ce système de pilotage envers l'environnement et le système physique ;
- et la politique de pilotage de flux adoptée par l'acteur.

La politique de pilotage de flux dans ce contexte permet de déterminer quand et pour quelle quantité envisager un engagement tel que l'engagement de transformation, de livraison ou de réapprovisionnement.

En pratique, les industriels utilisent principalement, sous des appellations diverses, deux types de politiques de pilotage de flux: celles qui mettent en œuvre le concept de flux poussé et celles qui mettent en œuvre le concept de flux tiré [François, 2007]. Pour des raisons de simplicité et sans perte de généralité, d'un côté, nous nous limitons dans le cadre de ce chapitre aux politiques qui sont largement pratiquées dans l'industrie comme ROP et Kanban, et d'un autre côté, les développements sont énoncés et illustrés sur un cas mono-produit, puis une généralisation aux systèmes multi-produits est donnée ultérieurement.

5.1.2.1 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Kanban

Plaçons-nous dans le cas où un acteur *i* est piloté en flux tiré en appliquant la méthode de Kanban. Le fait que nous utilisions Kanban pour un modèle continu, modifie quelque peu les notions qui lui sont associées [Bruniaux, 2000]. En effet, dans ce contexte, les étiquettes de Kanban circulant au niveau du système ne se perçoivent pas individuellement mais plutôt comme un flux continu. Kanban nous sert ici, tout simplement, à tirer le flux physique au niveau de l'acteur vers l'aval, en fonction des demandes réelles qui arrivent à chaque instant à cet acteur. Concrètement, l'arrivée d'une demande client à l'acteur déclenche directement ou

[9] Informations sur lesquelles se base le système de pilotage pour prendre une décision ; informations que leur origine soit l'environnement de l'acteur (demandes des clients et état du transport) ou qu'elles proviennent de l'acteur lui-même à partir de son système physique (états du processus de stockage et de transformation).

indirectement les différents engagements de son système de décision. Généralement, ces engagements sont synchronisés à travers les boucles de Kanban. A ce propos, lorsqu'une demande d'un client en aval se présente à l'acteur, ce dernier :

- tout d'abord, engage un ordre de livraison afin d'expédier les produits demandés au client aval ;
- ensuite, lance un ordre de transformation pour remplacer la quantité de produits enlevée du stock aval ;
- enfin, passe une commande à un ou à plusieurs fournisseurs pour remplacer la quantité de produits du stock amont qui vient d'être mise en transformation.

En nous inspirant du travail fait auparavant sur les RdPCs dans les domaines des systèmes de production [Amrah et al., 1997 ; Lefebvre, 2000 ; Silva et Recalde, 2002 ; Lefebvre et al., 2004] et du trafic routier [Tolba et al., 2005], nous pouvons représenter chaque acteur dans la CL par un modèle générique fondé sur le RdPCV dont le principe est illustré dans la figure III.13.

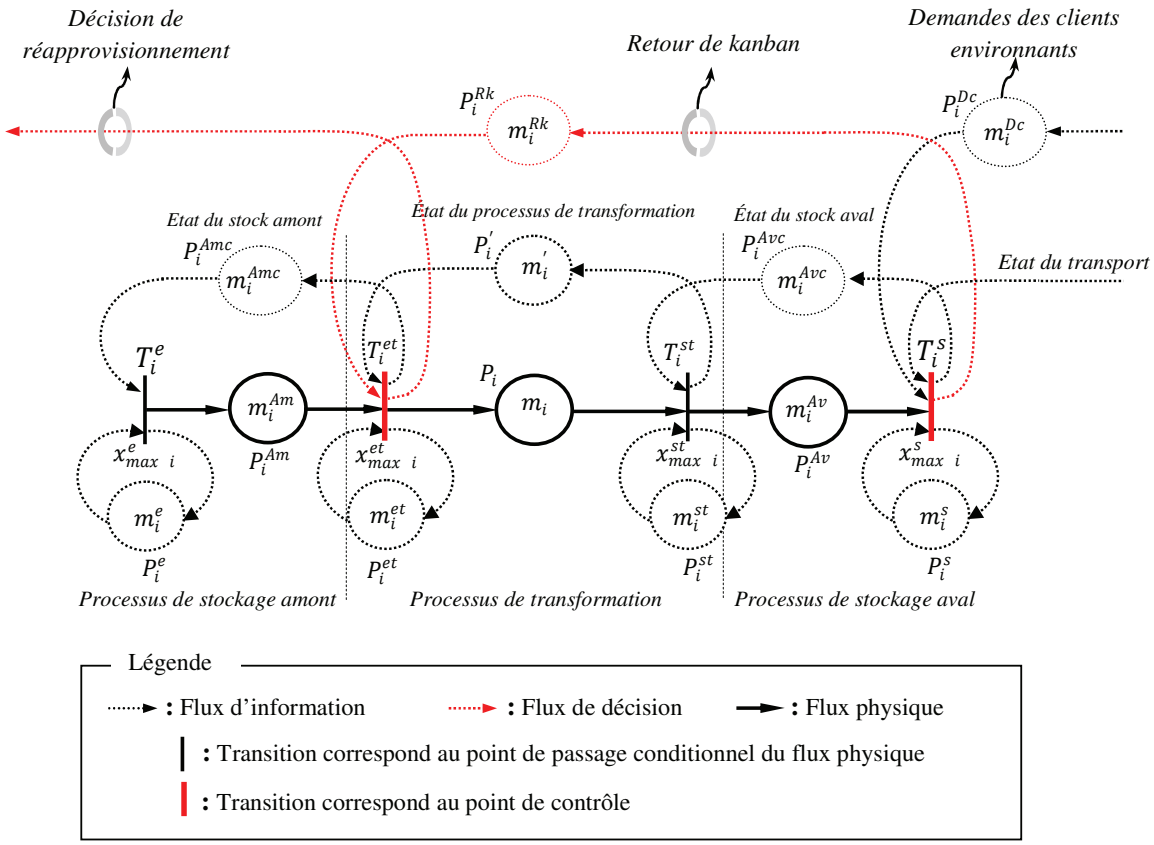


Figure III.13 *Modèle RdPCV d'un acteur dans la chaîne logistique piloté par Kanban.*

L'approvisionnement (flux d'entrée) et la livraison (flux de sortie) d'un acteur *i* sont représentés respectivement par les transitions T_i^e et T_i^s. Leurs franchissements reflètent les arrivées et les départs des produits. Ces deux transitions sont associées respectivement aux places P_i^e et P_i^s qui permettent de limiter leur nombre de franchissements simultanés. A cet égard, les marquages[10] de ces deux places traduisent respectivement le nombre maximal α_i^e de produits pouvant arriver simultanément à l'acteur *i* et le nombre maximal α_i^s de produits pouvant quitter simultanément cet acteur afin d'être livrés aux clients. Ceci implique les invariants de marquage suivants:

$$\begin{cases} \mathrm{m_i^e(t)} = \alpha_i^e \\ \mathrm{m_i^s(t)} = \alpha_i^s \end{cases} \quad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.10)}$$

Les places P_i^{Am} et P_i^{Av} représentent respectivement le stock amont et le stock aval de l'acteur *i*. Quant aux places P_i^{Amc} et P_i^{Avc}, elles sont introduites afin de matérialiser la limitation des capacités[11] de ces deux stocks C_i^{Am} et C_i^{Av} respectivement. Par conséquent, les marquages $m_i^{Am}(t)$ et $m_i^{Av}(t)$ correspondent respectivement aux quantités[12] de produits stockés, à un instant donné t, en amont et en aval du processus de transformation. D'un autre côté, les marquages $m_i^{Amc}(t)$ et $m_i^{Avc}(t)$ représentent respectivement les quantités instantanées d'emplacements disponibles dans ces deux stocks amont et aval. Ceci implique les invariants de marquage suivants:

$$\begin{cases} m_i^{Am}(t) + m_i^{Amc}(t) = \mathrm{C}_i^{Am} \\ m_i^{Av}(t) + m_i^{Avc}(t) = \mathrm{C}_i^{Av} \end{cases} \quad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.11)}$$

Étant donné que la politique Kanban limite les valeurs des stocks, nous considérons ici que les capacités des différents stocks de l'acteur sont suffisamment grandes (leur valeur C_i^{Am} et C_i^{Av} sont plus grande que la constante de Kanban k_i) afin de montrer l'effet de cette politique.

Le processus de transformation est, à son tour, représenté par les deux places P_i et P_i' délimitées par les transitions T_i^{et} et T_i^{st}. Ces deux transitions représentent respectivement le passage des quantités de produits, du stock amont, au processus de transformation et leur

[10] Nous pouvons considérer que le marquage du RdPCV représente la quantité de pièces ou bien la quantité de lots.
[11] En termes de quantité de produits.
[12] Notons ici que nous employons le terme « quantité » au lieu de celui de « nombre » parce que l'approche adoptée par le modèle RdPCV est une approche continue. Dans ce cas, toute variable correspondant à un marquage sera une variable continue définie dans l'espace des réels positifs (R^+).

sortie de ce processus pour être stockés temporairement dans le stock aval avant d'être livrés aux clients. Le marquage $m_i(t)$ de la place P_i représente la quantité instantanée de produits en cours de transformation par l'acteur *i*. Cette quantité évolue dans les limites de la capacité des ressources intervenant dans le processus de transformation. Autrement dit, la quantité de produits se trouvant à un instant donné dans le processus de transformation est limitée selon la capacité de transformation C_i de chaque acteur. Cette limitation de capacité est matérialisée par l'ajout de la place P_i' dont le marquage $m_i'(t)$ limite celui de la place P_i. Par conséquent, les deux marquages $m_i(t)$ et $m_i'(t)$ constituent un invariant de marquage :

$$m_i(t) + m_i'(t) = C_i \quad \forall\, t \geq 0 \tag{III.12}$$

La transition d'entrée du processus de transformation T_i^{et} est associée à une place P_i^{et} qui permet de limiter son nombre de franchissements simultanés. Ce nombre de franchissements simultanés correspond au nombre maximal α_i^{et} de produits pouvant être transférés simultanément du stock amont vers le processus de transformation (mise à disposition simultanée à la transformation). De même, la transition de sortie du processus de transformation T_i^{st} est associée à une place P_i^{st} qui permet de limiter le nombre de produits pouvant être mis en stock simultanément à α_i^{st} produits maximum. Par conséquent, les marquages $m_i^{et}(t)$ et $m_i^{st}(t)$ sont constants. Ceci implique les invariants de marquage suivants:

$$\begin{cases} m_i^{et}(t) = \alpha_i^{et} \\ m_i^{st}(t) = \alpha_i^{st} \end{cases} \quad \forall\, t \geq 0 \tag{III.13}$$

La conservation[13] des quantités de produits stockés et transformés par l'acteur *i* correspond aux équations d'évolution du marquage des places P_i^{Am}, P_i et P_i^{Av} du modèle RdPCV de l'acteur de la figure III.13:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{m}_i^{Am}(t) \\ \dot{m}_i(t) \\ \dot{m}_i^{Av}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^e(t) \\ x_i^{et}(t) \\ x_i^{st}(t) \\ x_i^s(t) \end{bmatrix} \tag{III.14}$$

- $M(t) = \left(m_i^{Am}(t),\, m_i(t),\, m_i^{Av}(t) \right)^T$ représente le vecteur de marquage du modèle RdPCV de l'acteur à l'instant *t*. Il correspond aux variables d'état des différents processus du système physique de l'acteur. La connaissance de ces variables à un instant initial t_0 permet de connaître l'état (la dynamique) du flux de produits à travers le système

[13] Rien ne se perd, rien ne se crée de rien, mais tout se transforme.

physique de l'acteur à tout instant donné $t > t_0$. Ces informations disponibles à chaque instant, doivent être prises en compte par le système de pilotage afin de décider des actions à conduire.

- $V(t) = \left(x_i^e(t),\ x_i^{et}(t),\ x_i^{st}(t),\ x_i^s(t) \right)^T$ représente le vecteur des vitesses de franchissement instantanées des transitions. A cet égard :
  - $x_i^e(t)$ représente la vitesse de franchissement de la transition T_i^e, traduisant la quantité de produits franchie par unité de temps qui représente pour sa part le débit (taux) d'arrivée des produits à l'acteur dont le débit maximal est $x_{max\ i}^e$.
  - $x_i^{et}(t)$ représente la vitesse de franchissement de la transition T_i^{et}, traduisant le débit de transfert des produits du stock amont au processus de transformation dont le débit maximal est $x_{max\ i}^{et}$.
  - $x_i^{st}(t)$ représente la vitesse de franchissement de la transition T_i^{st}, traduisant le débit de mise en stock des produits ayant terminé leur transformation, dont le débit maximal est $x_{max\ i}^{st}$.
  - $x_i^s(t)$ représente la vitesse de franchissement de la transition T_i^s, traduisant le débit de livraison des produits commandés par les clients aval, dont le débit maximal est $x_{max\ i}^s$.

Le système d'équations d'état (sous la forme matricielle) (III.14) décrit l'évolution des quantités de produits transitant par les différents processus du système physique de l'acteur, qui varie selon le bilan de flux entrant et sortant, à un instant donné, d'un processus.

Notons ici que les deux transitions T_i^e et T_i^{st} correspondent aux points de passage conditionnel. Leur franchissement est conditionné seulement par la disponibilité des produits en amont et des emplacements libres en aval de ces transitions. Ainsi, les vitesses de franchissement $x_i^e(t)$ et $x_i^{st}(t)$ de ces deux transitions sont de la forme :

$$x_i^e(t) = x_{max\ i}^e \,.\, min\,(\ \alpha_i^e\ ,\ m_{i-1}^T(t),\ \mathrm{C}_i^{Am} - m_i^{Am}(t)) \qquad \text{(III.15)}$$

$$x_i^{st}(t) = x_{max\ i}^{st} \,.\, min\,(\ \alpha_i^{st}\ ,\ m_i(t),\ \mathrm{C}_i^{Av} - m_i^{Av}(t)) \qquad \text{(III.16)}$$

Le marquage $m_{i-1}^T(t)$ représente la quantité instantanée de produits en cours de transportation. Autrement dit, la quantité de produits se trouvant à un instant donné dans l'infrastructure de transport amont de l'acteur *i*. Nous détaillerons d'avantage, dans la suite, la

forme de la vitesse de franchissement $x_i^e(t)$ de la transition T_i^e qui est liée au processus de transport amont de l'acteur *i*.

$x_{max\ i}^{st}$ représente le débit maximal de mise en stock des produits ayant terminés leur transformation. Il se définit comme l'inverse du temps nécessaire[14] $d_{\min i}$ pour transformer un flot de produits arrivant au processus de transformation. Ce temps est la somme des temps de préparation avant réalisation effective des opérations de transformation (réglage des machines, constitution des dossiers, etc.), les temps de réalisation des opérations de transformation proprement dites et, enfin, les temps de transfert et transport interne.

D'un autre côté, les deux transitions T_i^{et} et T_i^s correspondent aux points de contrôle, matérialisant ainsi les décisions prises par le système de pilotage. Leur franchissement n'est pas conditionné seulement par les conditions physiques[15] concernant l'état du système physique et du transport, à un instant donné, mais aussi par les commandes des clients et surtout par la politique de pilotage appliquée. Pour notre cas, avec la politique de Kanban, même si les conditions physiques de l'acteur *i* et de son transport aval sont satisfaites, la transition T_i^s n'est déclenchée qu'avec l'arrivée d'une demande de l'un des clients en aval. Une fois que cette transition est franchie, en livrant une quantité de produits en retour aux demandes clients, un ordre de transformation est lancé à travers le retour de la boucle de Kanban afin de remplacer la quantité de produits expédiée aux clients. Par conséquent, la transition T_i^{et} est déclenchée et une quantité de produits dans le stock amont est mise en transformation. Suite à ce déclenchement, une commande est passée à un ou à plusieurs fournisseurs pour remplacer la quantité de produits mise en transformation.

En ce sens, la vitesse instantanée de franchissement $x_i^s(t)$ de la transition T_i^s est majorée par la fréquence maximale de franchissement $x_{max\ i}^s$ associée à cette transition et elle dépend des différents marquages suivants :

- marquage de la place P_i^{Av}, c'est-à-dire, la quantité instantanée de produits $m_i^{Av}(t)$ mise en provision dans le stock aval en attendant leur livraison ;
- marquage de la place P_i^{Tc}, c'est-à-dire, la quantité instantanée d'emplacements libres $m_i^{Tc}(t)$ prévus pour les produits à transportés (ce type d'information renseignant sur l'état du transport aval de l'acteur *i* fera l'objet d'un développement ultérieur) ;
- marquage de la place P_i^s, c'est-à-dire, le nombre maximal α_i^s de produits pouvant être livrés simultanément aux clients ;

[14] Temps moyen nécessaire pour qu'un produit soit transformé par le processus de transformation en conditions de fonctionnement normal.
[15] Problèmes de capacités ou d'emplacements libres, de disponibilités de produits ou de véhicules.

- marquage de la place P_i^{Dc}, c'est-à-dire, la demande instantanée en attente (non encore servie) m_i^{Dc}(t) des clients en aval.

Par conséquent, la vitesse de franchissement $x_i^s(t)$ est décrite par la relation :

$$x_i^s(t) = x_{max\ i}^s . min\ (\ \alpha_i^s\ ,\ m_i^{Av}(t),\ m_i^{Tc}(t),\ m_i^{Dc}(t)) \qquad \text{(III.17)}$$

Signalons que dans certains cas, les livraisons sont d'une quantité fixe déterminée par les contraintes du système de transport. Ce point fera l'objet d'un développement par la suite dans la partie concernant le transport.

De même, la vitesse de franchissement $x_i^{et}(t)$ de la transition T_i^{et} est majorée par la fréquence maximale de franchissement $x_{max\ i}^{et}$ associée à cette transition et elle dépend des marquages suivants :

- marquage de la place P_i^{Am}, c'est-à-dire, la quantité instantanée de produits $m_i^{Am}(t)$ mis en provision dans le stock amont en attendant leur usage ;
- marquage de la place $P_i^{'}$, c'est-à-dire, la quantité instantanée $m_i^{'}(t)$ d'emplacements libres que peut utiliser le processus de transformation pour transformer encore plus de produits simultanément avec les m_i produits en cours de transformation pour atteindre la capacité de transformation C_i de l'acteur i ;
- marquage de la place P_i^{et}, c'est-à-dire, la capacité α_i^{et} de mise à disposition simultanée à la transformation ;
- marquage de la place P_i^{Rk}, c'est-à-dire, le retour de Kanban représentant la quantité instantanée d'étiquettes disponibles $m_i^{Rk}(t)$ qui traduit, à son tour, la quantité de produits instantanée effective qui doit être mise en transformation. Autrement dit, si m_i^{Dc}(t) représente une accumulation instantanée de demandes clients non servies, $m_i^{Rk}(t)$ représente une accumulation instantanée d'autorisations de transformation.

Par conséquent, la vitesse de franchissement $x_i^{et}(t)$ est décrite par la relation :

$$x_i^{et}(t) = x_{max\ i}^{et} . min\ (\ \alpha_i^{et}\ ,\ m_i^{Am}(t),\ C_i - m_i(t),\ m_i^{Rk}(t)) \qquad \text{(III.18)}$$

le marquage $m_i^{Rk}(t)$ constitue ici avec les autres marquages $m_i(t)$ et $m_i^{Av}(t)$ un invariant de marquage :

$$m_i(t) + m_i^{Av}(t)\ +\ m_i^{Rk}(t) = K_i^t \qquad \forall\ t \geq 0 \qquad \text{(III.19)}$$

où K_i^t est une constante représentant la taille de la boucle Kanban (T_i^{et},T_i^s) ; la boucle qui pilote le processus de transformation.

Notons ici que même si la capacité du processus de transformation n'est pas finie, la politique Kanban limite les en-cours de transformation et empêche que les valeurs des stocks n'atteignent des niveaux anormalement élevés. A l'opposé, la politique Kanban présente l'inconvénient de ralentir la remontée des décisions vers l'amont. En effet, la décision qui est transmise en amont par un retour de Kanban est arrêtée provisoirement dès qu'un stock de produits vide est rencontré. Plus précisément, tant qu'on ne dispose pas de produits dans le stock aval de l'acteur, le lancement de l'ordre de transformation est bloqué. Ainsi, la génération de décision à ce niveau est conditionnée par une livraison de produits. De même, tant qu'on ne dispose pas de produits dans le stock amont de l'acteur, le lancement de l'ordre de réapprovisionnement est bloqué. La décision ne peut donc pas remonter en amont d'un stock vide. Cette limite constitue un frein à la performance de la politique de pilotage et rend l'acteur moins réactif vis-à-vis des demandes de clients aval.

Afin de remédier aux insuffisances de la politique de Kanban, des extensions ont été développées. Dans ce contexte, l'extension Kanban généralisé, accélère la remontée des décisions vers l'amont en relâchant la contrainte de synchronisation des décisions avec le transfert des produits.

5.1.2.2 Modèle RdPCV d'un acteur piloté par la politique Finite-buffer

Plaçons-nous maintenant dans le cas où un acteur *i* est piloté par la méthode de Finite-buffer [Ettl, 1995]. A ce niveau, le flux et les différents processus de l'acteur sont pilotés par des boucles de recomplètement de stocks. La majorité des entreprises utilisent ce principe de pilotage pour faire face aux demandes clients stables [Essaïd, 2008].

La politique Finite-buffer est une politique assez facile à mettre en œuvre. Elle consiste à continuer :

- à réapprovisionner tant que le stock amont de l'acteur n'est pas encore plein,
- à transformer tant que le processus de transformation n'a pas encore atteint sa capacité maximale,
- et à stocker tant que le stock aval peut toujours recevoir des produits.
- Lorsque le stock amont est vide ou que le stock aval est plein, le processus de transformation se bloque. Nous distinguons ainsi deux types de blocage, avant service et après service. Si le stock amont est vide, le blocage est avant service, les produits ne rentreront pas dans le processus de transformation. Si le stock aval est déjà plein, le blocage est après service, les produits rentrent dans le processus de transformation ; toutefois ils seront bloqués et ils empêcheront que d'autres y entrent tant que le stock

aval ne s'est pas vidé d'une unité. Le processus de transformation avec cette politique de pilotage n'utilise pour son contrôle que les informations locales sur :

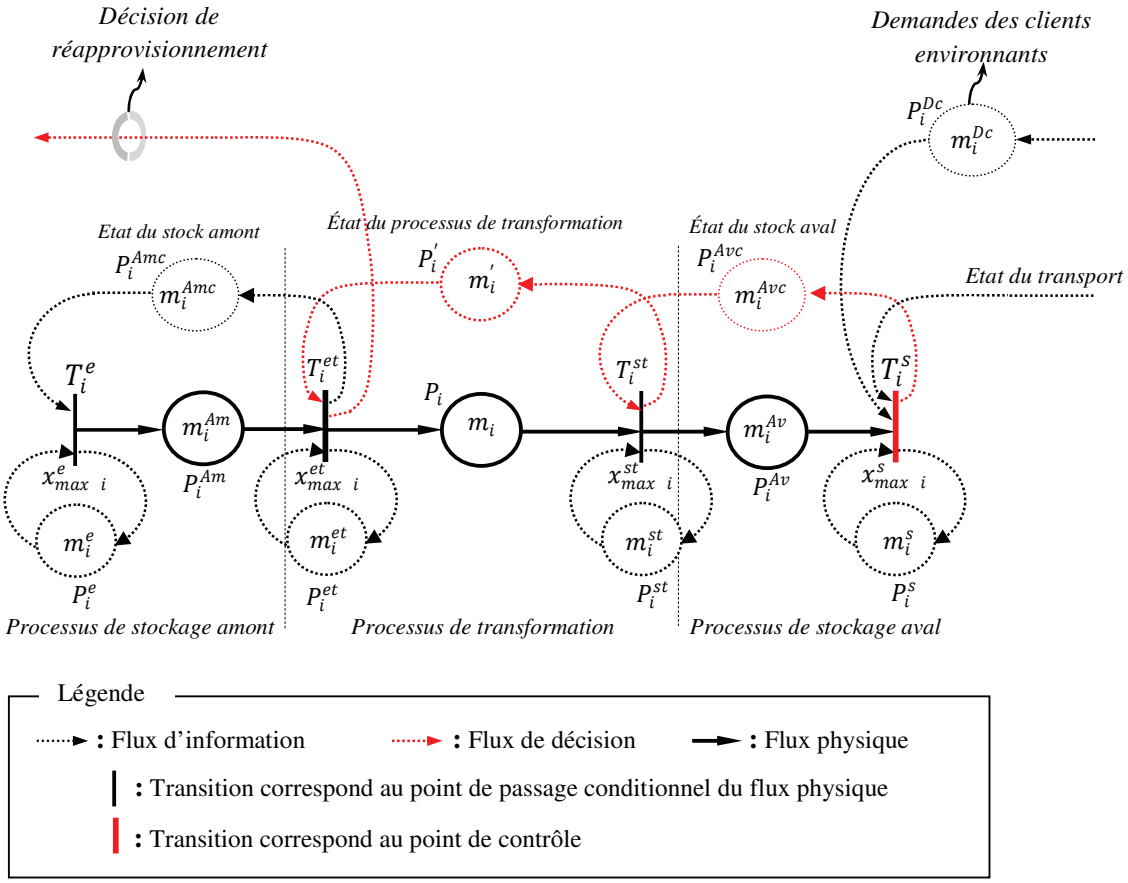


Figure III.14 *Modèle RdPCV d'un acteur dans la chaîne logistique piloté par Finite-buffer.*

- la quantité instantanée $m_i^{'}(t)$ d'emplacements libres que peut utiliser encore le processus de transformation ;
- la quantité instantanée de produits $m_i^{Am}(t)$ disponible dans le stock amont ;
- et la capacité α_i^{et} de mise à disposition simultanée à la transformation.

Par conséquent la transition T_i^{et} ne correspond plus au point de contrôle mais au point de passage conditionnel. Son franchissement est conditionné seulement par la disponibilité des produits en amont et des emplacements libres en aval de cette transition. Avec ces conditions, c'est l'information sur l'état du processus de transformation (matérialisée par une couleur rouge sur la figure III.14) qui joue le rôle décisif dans le déclenchement de ce dernier. Ainsi, la vitesse de franchissement $x_i^{et}(t)$ de cette transition est de la forme :

$$x_i^{et}(t) = x_{max\ i}^{et}\ .min\ (\ \alpha_i^{et}\ ,\ m_i^{Am}(t),\ C_i - m_i(t)) \qquad \text{(III.20)}$$

Bien que la livraison soit synchronisée avec l'arrivée de demande client, la transformation et le réapprovisionnement ne tiennent pas compte de l'évolution de cette

demande. Le réapprovisionnement est déclenché en permanence tant que le stock amont de l'acteur n'est pas encore plein. De même, le processus transformation est engagé continuellement tant qu'il n'a pas encore atteint sa capacité maximale (et tant que le stock amont n'est pas vide).

Notons ici que la politique de pilotage Kanban (cf. figure III.13) devient identique à celle du Finite-buffer (cf. figure III.14) lorsque la taille de la boucle Kanban est infinie ($K_i^t \to \infty \ \ \forall\, t \geq 0$). De même, la politique de pilotage Finite-buffer devient identique à celle du stock nominal « basestock » lorsque le fonctionnement des différents processus de l'acteur est limité par des niveaux nominaux associé à ces processus et non plus par leur capacité maximale, à condition toutefois que la demande client soit dupliquée à tous les processus de l'acteur.

5.1.3 Cas spécifique de l'acteur

Après avoir décrit la structure générique (ou le modèle conceptuel) de l'acteur dans la CL et avoir élaboré son modèle RdPCV, nous montrerons ici comment ce cadre générique de représentation s'adapte aux spécificités des différents acteurs de la CL et à l'instanciation d'un grand nombre de processus. Notons ici que les modèles seront donnés seulement avec un seul type de politique de pilotage « Kanban ».

5.1.3.1 Cas de l'acteur fournisseur

Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre, l'acteur fournisseur constitue la source où les flux de matières sont initiés dans la CL. Ainsi, nous considérons qu'il possède de la matière première (brute) en quantité infinie. Il doit tout de même lui faire subir des transformations (fabrication, affectation, conditionnement, emballage, etc.) avant de la transférer dans un stock de sortie en attendant la demande des acteurs en aval. Il est alors composé des mêmes processus que ceux que nous avons décrits pour l'acteur générique. Sa principale spécificité réside dans la caractéristique du stock amont qui ne se vide jamais à cause de la présence d'une quantité infinité de matière première (si cela est possible, c'est que la capacité du stock amont est considérée illimitée). Par conséquent, cet acteur ne peut établir, dans la CL, que le contact en aval (cf. section § 5.1.1 dans ce chapitre). Son modèle RdPCV (cf. figure III.15) est instancié de manière évidente du modèle RdPCV de l'acteur générique que nous avons présenté dans la figure III.13. La vitesse de franchissement de la transition T_i^{et} ne dépend plus de la quantité instantanée de produits (matière première) disponible dans le stock amont car cette quantité est supposée infinie ($m_i^{Am}(t) \xrightarrow{\forall\, t \geq 0} \infty$). Ce qui justifie également l'implicité du stock amont dans le modèle RdPCV (sa disparition). Cela signifie

entre autre que les fournisseurs dans la CL sont toujours capables de répondre aux demandes de leurs acteurs clients. Par conséquent, la vitesse de franchissement $x_i^{et}(t)$ est réécrite par :

$$x_i^{et}(t) = x_{max\ i}^{et} . min\ (\ \alpha_i^{et}\ ,\ C_i - m_i(t),\ m_i^{Rk}(t)) \qquad \text{(III.21)}$$

A cet égard, l'acteur fournisseur peut être vu comme une source de flux modulée par la boucle de Kanban, dont l'objectif est de fournir aux acteurs clients de la matière première ou des produits semi-finis tout en respectant, à la fois, la demande arrivant au fournisseur et les conditions physiques concernant l'état du fournisseur et du transport.

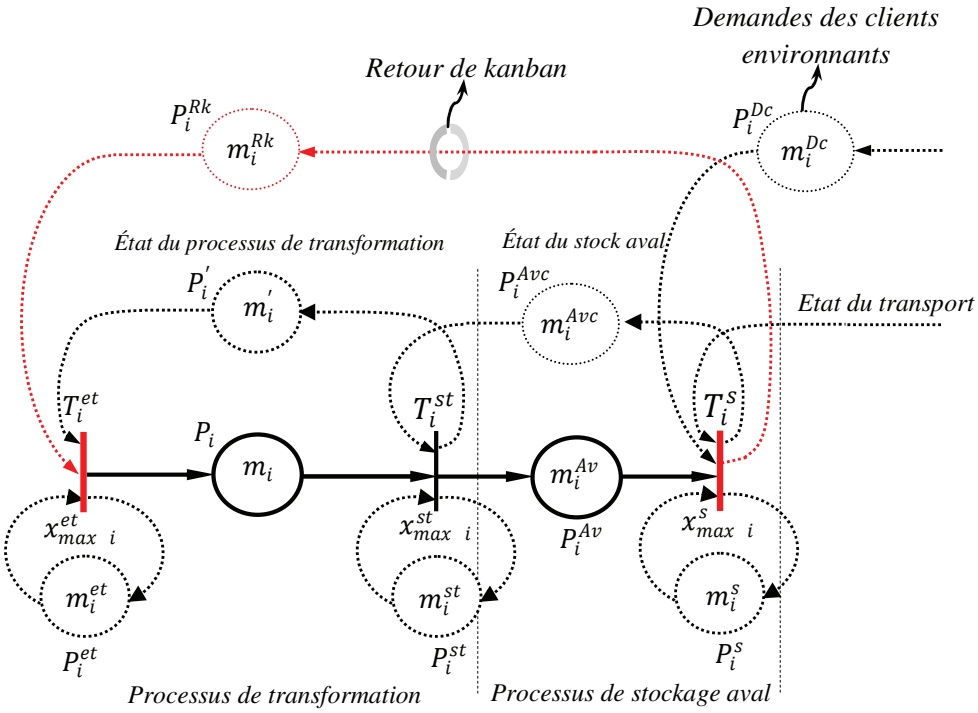


Figure III.15 *Modèle RdPCV d'un acteur fournisseur dans la chaîne logistique piloté par Kanban.*

5.1.3.2 Cas de l'acteur producteur

Selon, la disposition des ressources, les opérations de base, et la nature des liens d'interaction rencontrées dans le contexte du producteur, on distingue trois configurations de base conduisant à trois types de filières précisant la nature de transformation effectuée sur les produits au sein du producteur. Il s'agit [Ershler et Grabot, 2001] de filière de fabrication, d'assemblage et de désassemblage. Par conséquent, selon la mission du producteur dans la CL, nous distinguons trois acteurs[16] :

- Acteur fabricateur ;
- Acteur assembleur ;
- Acteur désassembleur.

[16] Nous ne voulons pas réduire le producteur à un seul acteur afin de facilité le pilotage.

A. Modèle RdPCV de l'acteur fabricateur

L'acteur fabricateur peut être vu comme un réseau de ressources élémentaires en interaction entre elles invoquant des processus de stockage, amont et aval, et également un processus de fabrication qui consiste à transformer le flux d'entrée (matières premières, composants) en flux de sortie (composants, produits finis ou semi-finis). Par exemple, un processus de fabrication peut être vu comme des lignes de flowshop[17] en parallèle. Les flowshops sont formés par des machines en série sur lesquelles passent les composants pour ajouter de la valeur. Si nous nous référons au modèle RdPCV de l'acteur générique de la figure III.13, le processus de transformation correspond exactement au processus de fabrication constitué des lignes de flowshop. Dans ce contexte, Le marquage $m_i(t)$ de la place P_i du modèle représente la quantité instantanée de produits en cours de fabrication dans les différentes lignes de flowshop. Cette quantité évolue dans les limites de capacité des ressources intervenant dans ces lignes de fabrication. Quant à la capacité de mise à disposition simultanée à la transformation α_i^{et} du modèle, elle correspond au nombre de lignes flowshop.

Le modèle RdPCV de l'acteur fabricateur est le même que celui que nous avons proposé pour l'acteur générique (cf. figure III.13), il n'est pas intéressant de répéter l'analyse que nous avons déjà menée.

B. Modèle RdPCV de l'acteur assembleur

Cet acteur se caractérise par la présence :

- d'un processus d'assemblage qui consiste à associer divers flux de composants et matières (au moins deux) afin de constituer un flux de produits finis ;
- de différents stocks en amont du processus d'assemblage dont chacun stocke les produits d'un type de flux différent. Afin d'acquérir ces produits intermédiaires, l'acteur considéré établi des contacts en amont avec plusieurs acteurs fournisseurs ;
- d'un stock aval dans lequel est déposé le produit fini issu du processus d'assemblage (cf. figure III.17).

[17] flowshop ou atelier à cheminement unique est un atelier où le processus d'élaboration de produits est dit « linéaire », c'est-à-dire lorsque les étapes de transformation sont identiques pour tous les produits fabriqués. Nous avons choisi cette structure comme exemple car c'est la structure la plus utilisée dans l'industrie.

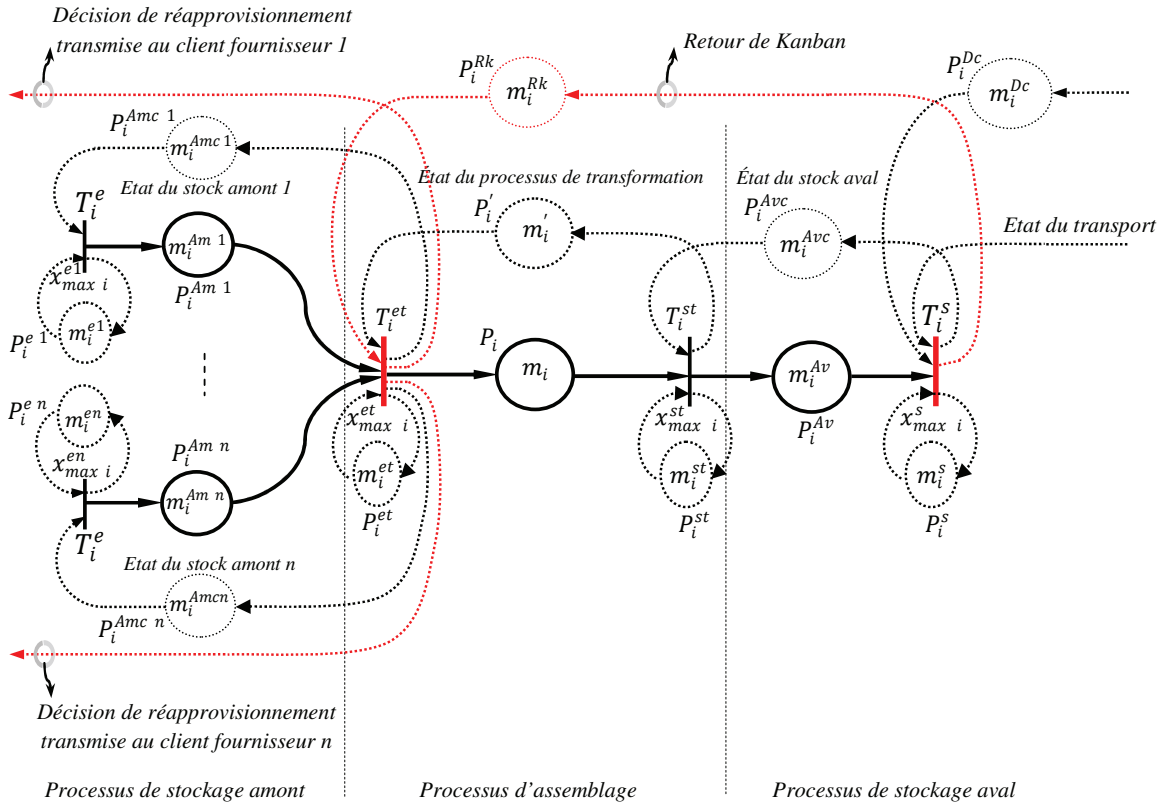


Figure III.16 *Modèle RdPCV d'un acteur assembleur dans la chaîne logistique piloté par Kanban.*

La transformation apportée par le processus d'assemblage impacte le flux quantitativement et qualitativement. En effet, la quantité de produits du flux sortant de ce processus est inférieure à celle entrant. Ainsi, la réalisation de cet acteur réduit le nombre de produits sortant en fonction de la nomenclature d'assemblage définie pour le produit assemblé [Alkassem, 2007].

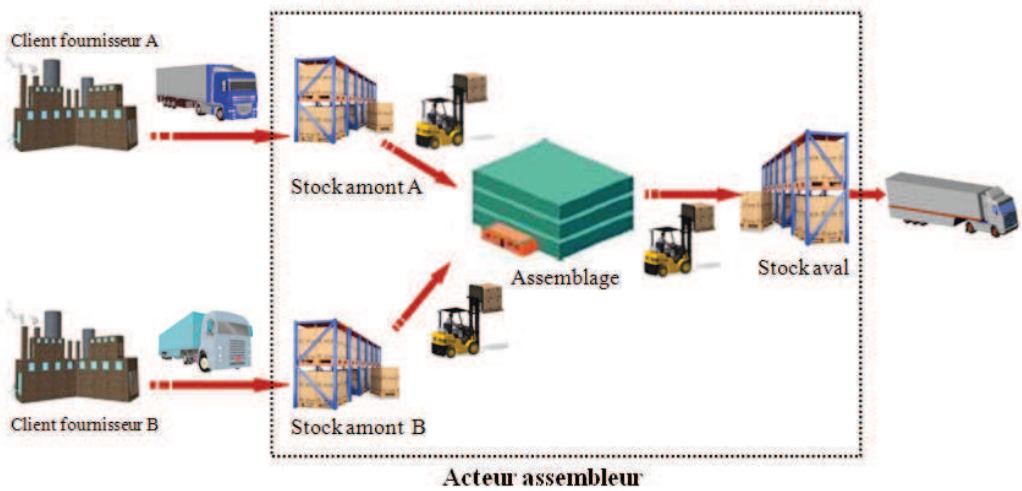


Figure III.17 *Schéma représentatif d'un acteur assembleur en interaction avec son environnement.*

Le modèle RdPCV de l'acteur assembleur est obtenu par simple ajout d'un détail, sur le processus de stockage amont, au modèle RdPCV de l'acteur générique que nous avons présenté dans la figure III.13. En effet, le processus de stockage amont de l'acteur assembleur ne dispose plus d'un seul stock amont, mais au moins de deux. Ces différents stocks amont permettent de recevoir les différents types de produits requis pour l'assemblage d'un type de produits final. Ainsi, différents types de flux de produits sont associés simultanément, au niveau du processus d'assemblage, pour ne former qu'un seul type de flux de produits sortant.

A cet égard, lorsqu'une décision d'assemblage se présente, elle autorise le déclenchement du processus d'assemblage, à condition toutefois que sa capacité le permette et qu'aucun stock amont ne soit vide. Le processus d'assemblage est alors en situation de rupture si l'un de ses stocks en amont est vide. Ce déclenchement du processus d'assemblage est matérialisé sur le modèle RdPCV de l'acteur assembleur (cf. figure III.16) par le franchissement de la transition T_i^{et} dont la vitesse $x_i^{et}(t)$ dépend de l'accumulation instantanée d'autorisations d'assemblage $m_i^{Rk}(t)$, de l'état et de la capacité du processus d'assemblage $\{m_i'(t), \alpha_i^{et}\}$ et des quantités instantanées $m_i^{Am\ j\ (j=1,\dots,n)}(t)$, de produits mis en provision dans les différents stocks amont en attendant leur assemblage. Par conséquent, $x_i^{et}(t)$ est décrite par la relation :

$$x_i^{et}(t) = x_{max\ i}^{et}\ .min\ (\ \alpha_i^{et}\ ,\ m_i^{Am\ 1}\ (t), \dots,\ m_i^{Am\ n}\ (t),\ C_i - m_i(t),\ m_i^{Rk}(t)) \qquad \text{(III.22)}$$

Suite au franchissement de la transition T_i^{et}, une commande est dupliquée à tous les clients fournisseurs de l'acteur considéré pour remplacer les quantités de produits mises en assemblage.

Notons ici qu'un assemblage de différents types de flux de produits selon des rapports prédéterminés (en fonction de la nomenclature d'assemblage définie pour un type de produit à assembler) est possible à travers le modèle RdPCV. A cet égard, le rapport associé à un flux d'arrivée à l'assembleur est matérialisé, dans le modèle RdPCV de l'acteur assembleur, par un poids b_i^j indiqué sur l'arc sortant de la place $P_i^{Am\ j}$ correspondant au stock amont recevant le flux considéré.

C. Modèle RdPCV de l'acteur désassembleur

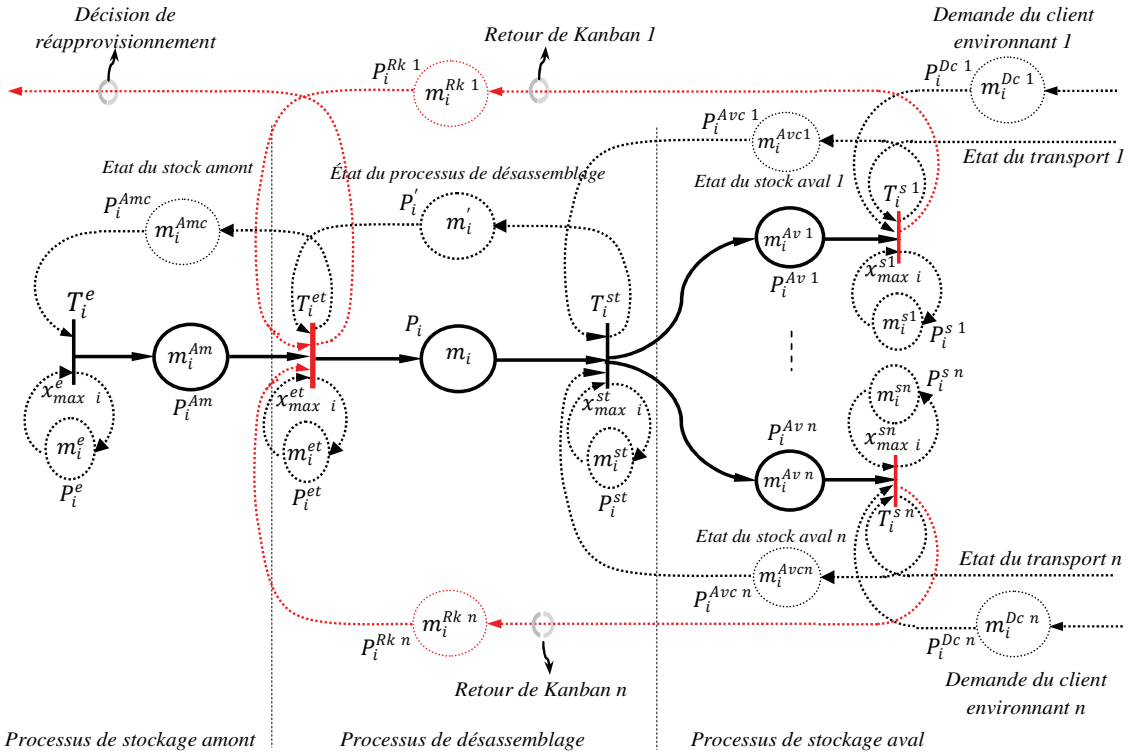


Figure III.18 *Modèle RdPCV d'un acteur désassembleur dans la chaîne logistique piloté par Kanban.*

A l'inverse de l'acteur assembleur qui associe divers flux d'entrée afin de constituer un seul flux de sortie, l'acteur désassembleur dissocie un flux d'entrée en plusieurs flux de sortie.

Cet acteur se caractérise par la présence :

- d'un processus de désassemblage, qui permet d'obtenir simultanément divers types de flux de produits par séparation d'un flux de produits initial ;
- d'un stock amont, dans lequel est déposé le type de produits initial approvisionné en provenance d'un acteur amont, en attendant son désassemblage ;
- de différents stocks en aval, dans lesquels sont déposés les différents types de produits issus simultanément du processus de désassemblage, en attendant leur livraison aux clients aval. Chaque stock aval ne peut contenir qu'un seul type de produits (cf. figure III.19).

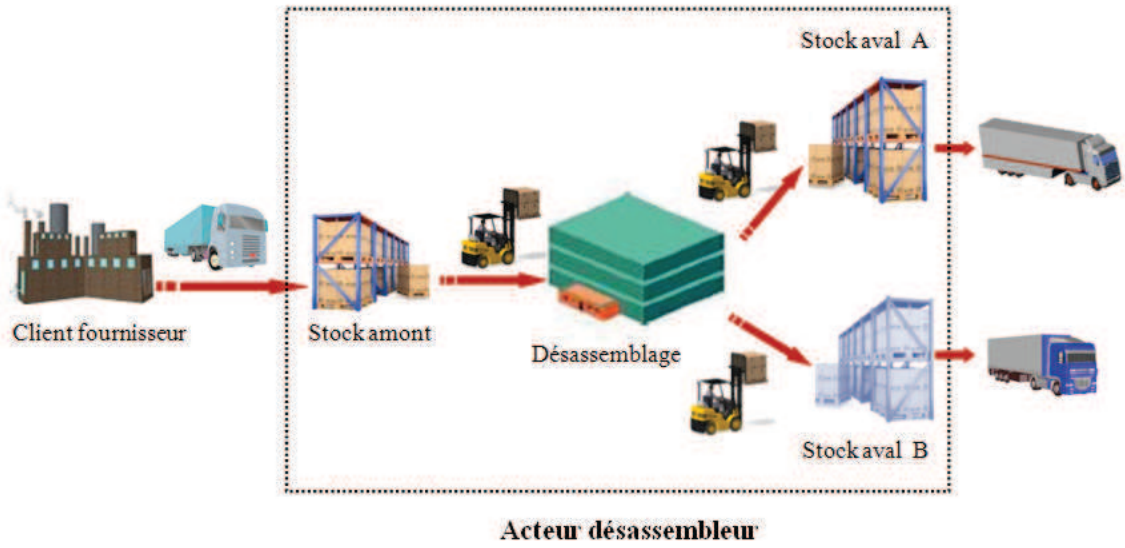


Figure III.19 *Schéma représentatif d'un acteur désassembleur en interaction avec son environnement.*

Comme dans le processus d'assemblage, la transformation apportée par le processus de désassemblage impacte le flux quantitativement et qualitativement. La quantité de produits du flux sortant de ce processus est supérieure à celle entrante. Par conséquent, la loi de conservation de la matière n'est pas valable non plus pour cet acteur et sa réalisation augmente le nombre de produits sortant en fonction de la nomenclature de désassemblage.

Comme dans le cas de l'acteur assembleur, le modèle RdPCV de l'acteur désassembleur est obtenu aussi par simple ajout d'un détail, mais cette fois là sur le processus de stockage aval, au modèle RdPCV de l'acteur générique que nous avons présenté dans la figure III.13. En effet, le processus de stockage aval de l'acteur désassembleur ne dispose plus d'un seul stock aval, mais au moins de deux. Ces différents stocks aval permettent de recevoir les différents types de produits issus simultanément du processus de désassemblage suite au désassemblage d'un type de produits initial. Ainsi, un type de flux de produits initial entrant, dans cet acteur, est dissocié au niveau du processus de désassemblage pour en former simultanément différents types de flux de produits sortant.

A cet égard, en appliquant la politique de pilotage Kanban, le fonctionnement du processus de désassemblage dépend, d'un côté, de l'état physique des différents processus de l'acteur considéré et d'un autre côté des différentes décisions engagées.

Ainsi, dans le cas de disponibilité du type de produits initial dans le stock amont, et d'emplacements libres que peut utiliser encore le processus de désassemblage, le déclenchement de ce dernier est conditionné par la présence simultanée de tous les ordres de

désassemblage qui sont lancés pour remplacer les quantités de produits enlevées des stocks aval suite aux demandes engagées par les clients. Par conséquent, si l'un des types de produits issu du processus de désassemblage ne fait l'objet d'aucune demande des clients, aucun produit ne sera enlevé du stock aval correspondant à ce type de produits. Donc, aucun ordre de désassemblage concernant ce type de produits ne sera lancé. Cela conduira au blocage du processus de désassemblage, même avec la présence des ordres de désassemblage concernant les autres types de produits issus du processus de désassemblage. Cette limite peut être relâchée avec la politique de pilotage Finite-buffer (ou basestock) dont le déclenchement du processus de désassemblage dépend uniquement des conditions physiques des différents processus de l'acteur. Ce déclenchement du processus de désassemblage est matérialisé sur le modèle RdPCV de l'acteur désassembleur (cf. figure III.18) par le franchissement instantané de la transition T_i^{et} dont la vitesse $x_i^{et}(t)$ dépend de toutes les accumulations instantanées d'autorisations de désassemblage $m_i^{Rkj\ (j=1,\dots,n)}(t)$, de l'état et de la capacité du processus de désassemblage $\{m_i'(t), \alpha_i^{et}\}$ et de la quantité instantanée $m_i^{Am}(t)$ de produits mis en provision dans le stock amont en attendant leur désassemblage. Par conséquent, $x_i^{et}(t)$ est décrite par la relation :

$$x_i^{et}(t) = x_{max\ i}^{et} . min\ (\ \alpha_i^{et}\ ,\ m_i^{Am}(t)\ ,\ C_i - m_i(t),\ m_i^{Rk\ 1}(t), \dots, m_i^{Rk\ n}(t)) \quad \text{(III.23)}$$

Notons, que si l'un des stocks aval est saturé, le processus de désassemblage sera bloqué et son blocage est de type ***après service***.

5.1.3.3 Cas de l'acteur distributeur

L'acteur distributeur sert d'intermédiaire entre les producteurs et les consommateurs (clients finals ou bien aux points de ventes) permettant ainsi de rapprocher l'offre et la demande [Dioux et Dupuis, 2005]. Dans ce rôle d'intermédiaire, l'acteur distributeur participe à la mise à disposition des produits finis des producteurs vers les consommateurs. Selon la nature de ces produits et le type de leur transfert, deux types de structure de base de l'acteur distributeur sont distinguées : distributeur avec un entrepôt et distributeur avec une plate-forme.

A. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec un entrepôt

A travers la structure de l'entrepôt, l'acteur distributeur assure la réception, la préparation, le stockage et l'expédition des produits afin de satisfaire les commandes des clients. En effet, les produits sont réceptionnés auprès de l'acteur ou des acteurs amont ayant

une connexion de transport avec l'acteur distributeur considéré. Une phase de stockage de ces produits commence, si le stockage est nécessaire. Ensuite vient la phase de préparation où des nouveaux lots sont formés, des produits sont installés, des informations nécessaires ou des conseils sont apportés, etc. Enfin, les produits préparés sont stockés en attendant leur expédition aux acteurs en aval. Généralement la capacité du stock de réception de l'entrepôt et celle de la zone de stockage sont bien limitées [Ding et al., 2004]. En effet, la capacité de réception est liée principalement aux différentes ressources matérielles et humaines présentes dans le centre de distribution. Quant à la capacité de stockage, elle correspond à la limitation physique d'un centre de distribution pour stocker les produits. La capacité d'expédition est une contrainte aussi souvent liée soit à la taille du moyen de transport et l'état de son infrastructure, soit aux moyens disponibles (matériels et humains).

Selon les liens d'interconnexion établis par l'entrepôt avec les producteurs et les consommateurs, nous distinguons trois principales typologies de distribution précisant la nature d'échange de flux entre l'entrepôt et les autres acteurs. Il s'agit des typologies de distribution convergente, divergente et convergente/divergente (cf. figure III.20).

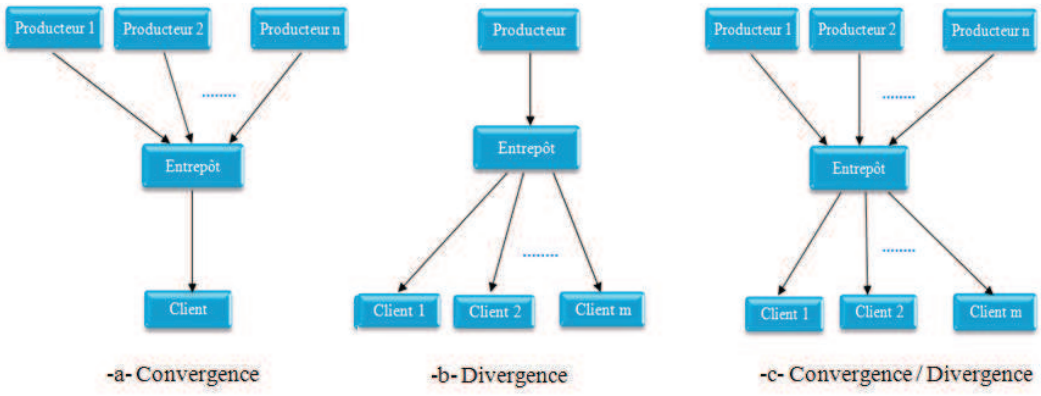


Figure III.20 *Principales typologies de distribution.*

a. Typologie de distribution convergente

Dans ce cas, plusieurs flux de produits réceptionnés auprès des acteurs amont se rejoignent au niveau du stock de réception de l'entrepôt pour n'en former qu'un seul flux en sortie (cf. figure III.20-a-). Ce dernier doit être soumis à différentes opérations de préparation et de conditionnement, en transitant par le processus de préparation, avant d'arriver à la zone de stockage de l'entrepôt. Les produits stockés dans cet entrepôt sont expédiés vers un seul client en aval.

La convergence des flux à travers cette structure de distribution ne change pas les caractéristiques de produits du flux. Contrairement à l'acteur d'assemblage, les produits entrant et sortant de la structure de distribution convergente sont les mêmes. D'un point de vue quantitatif, le flux est soumis à la loi de conservation de la matière. Ainsi, la quantité de produits de l'ensemble des flux entrant est égale à celle du flux sortant.

Le modèle RdPCV de cette structure de distribution convergente correspond au modèle RdPCV de l'acteur générique que nous avons présenté dans la figure III.13 avec des modifications. En effet, le stock de réception de l'entrepôt correspond au stock amont de l'acteur générique. Ce stock de réception est alimenté par plusieurs flux de produits en amont. Quant aux processus de préparation et à la zone de stockage de l'entrepôt, ils correspondent respectivement au processus de transformation et au stock aval de l'acteur générique.

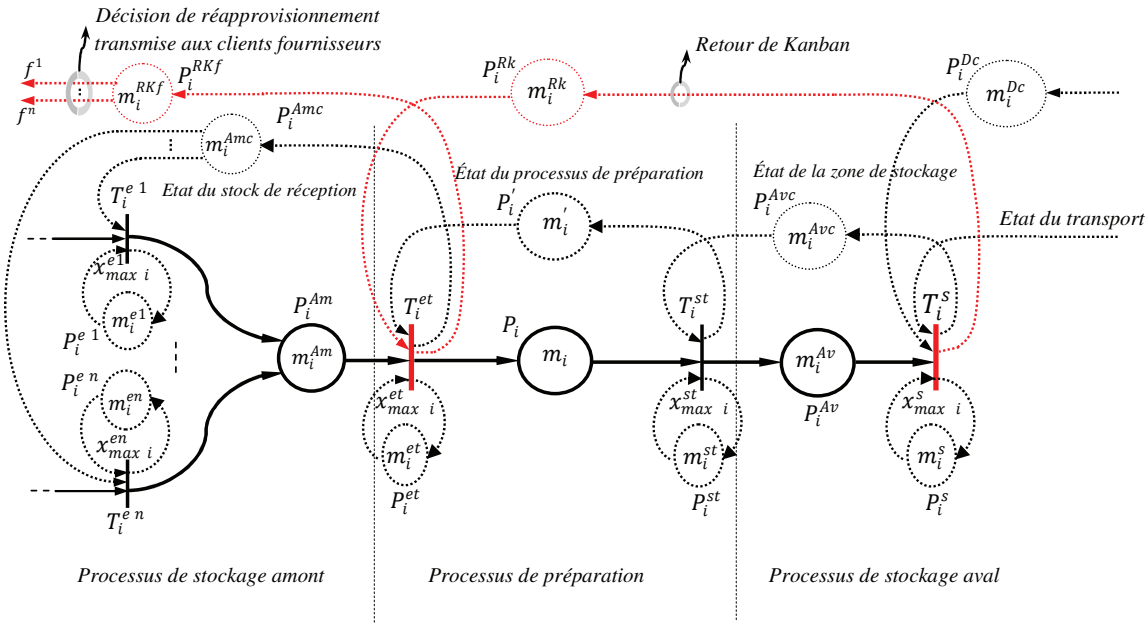


Figure III.21 *Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est convergente.*

La conservation des quantités de produits au niveau du stock de réception correspond à l'équation d'évolution du marquage de la place P_i^{Am} du modèle RdPCV de la structure de distribution convergente de la figure III.21:

$$\frac{dm_i^{Am}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n} x_i^{ej}(t) - x_i^{et}(t) \qquad \text{(III.24)}$$

$x_i^{ej}(t), j = 1, \dots, n$: représentent les flux de produits entrant à un instant donné dans le stock de réception de l'entrepôt. Ces flux sont approvisionnés en provenance des acteurs amont. Ils sont calculés comme suit :

$$x_i^{e\,j}(t) = x_{max\ i}^{e\,j}\,.\,min\,(\ \alpha_i^{e\,j}\ ,\ m_{i-1}^{T\,j}(t), m_i^{Amc}(t)) \quad \forall\, j, j = 1, \dots, n \tag{III.25}$$

Toutefois, étant donné que la totalité de ces flux ne peut jamais dépasser la capacité réservée au stock de réception, la quantité instantanée d'emplacements disponibles dans ce dernier *(* $m_i^{Amc}\,(t\ ))$ sera partagé entre les flux entrant au stock de manière à respecter cette contrainte de capacité tout en répondant à l'objectif fixé par l'acteur distributeur considéré. Ainsi, $m_i^{Amc}\,(t\ )$ est donnée en fonction des facteurs de partage du stock de réception entre les différents flux entrant dans ce dernier :

$$m_i^{Amc}\,(t) = \sum_{j=1}^{n}\ \beta_i^j\ (C_i^{Am} - m_i^{Am}(t)) \qquad \forall\, t \geq 0 \tag{III.26}$$

$\beta_i^{j,j=1,\dots,n}$: sont des facteurs de partage décrivant la façon dont l'espace disponible du stock de réception est partagé entre les flux entrant. Ces facteurs satisfont aux conditions suivantes :

$$\left|\begin{array}{l} 0 \leq \beta_i^{j,\ j=1,\dots,n} \leq 1 \\ \displaystyle\sum_{j=1}^{n} \beta_i^j = 1 \end{array}\right. \tag{III.27}$$

Selon les objectifs recherchés par l'acteur distributeur, plusieurs manières sont possibles pour définir ces facteurs [Bruniaux, 2000]. Un premier objectif consiste par exemple à respecter au mieux des répartitions initialement prévues « ratios ». Ces rations constantes peuvent correspondre par exemple à un équilibrage initial du personnel (réparti en fonction de chaque flux d'entrée). Dans ce cas, les facteurs peuvent être définis comme suit :

$$\beta_i^{\,j} = Ratio_{\ i}^{\ j} \qquad \forall j,\ j = 1,\dots,\ n \tag{III.28}$$

Un autre objectif consiste à limiter au maximum l'attente des commandes. Dans ce cas, les facteurs peuvent être donnés de la manière suivante :

$$\beta_i^{\,j} = \frac{m_j^{Di}}{\displaystyle\sum_{j=1}^{n} m_j^{Di}} \qquad \forall j,\ j = 1,\dots,\ n \tag{III.29}$$

où m_j^{Di} représente la demande en attente (quantité cumulée et non encore servie) qui a été transmise par le distributeur considéré *i* vers le producteur *j* et, par conséquent, $\sum_{j=1}^{n} m_j^{Di}$ est la somme des demandes transmises par ce distributeur vers tous les producteurs de son contact en amont.

Un dernier objectif consiste à rechercher l'utilisation maximum de la capacité du stock de réception afin de le rentabiliser le plus rapidement possible. Dans ce cas, les facteurs peuvent être donnés de la manière suivante :

$$\beta_i^j = \frac{min\ (\alpha_i^{s\,j}, m_j^{Di}, m_j^{Av})}{\sum_{j=1}^{n} min\ (\alpha_i^{s}, m_j^{Di}, m_j^{Av})} \qquad \forall j,\ j = 1,..., n \qquad \text{(III.30)}$$

où $\alpha_i^{s\,j}$ représente le nombre maximal de produits pouvant quitter simultanément le producteur *j* afin d'être livrés au distributeur considéré *i*, m_j^{Di} représente la demande en attente du producteur *j* qui doit être livrée au distributeur *i*, m_j^{Av} représente la quantité instantanée disponible dans le stock aval du producteur *j*.

Nous nous servons de ces facteurs de partage pour résoudre le problème de conflit effectif lorsque les transitions d'entrée $T_i^{ej,j=1,...,n}$ ne peuvent pas être franchies à leurs vitesses maximales $x_{max\,i}^{ej,j=1,...,n}$ (nous renvoyons le lecteur à [David et Alla, 1999 ; Alla et David, 1998] pour plus de détails sur cette méthode de partage pour résoudre un conflit dans RdPCV).

b. Typologie de distribution divergente

Dans ce cas, le flux de produits arrive au distributeur en provenance d'un seul producteur en amont pour qu'il se répartisse sur plusieurs clients en aval comme le montre la figure III.20-b-. Cette répartition des produits entre plusieurs clients en aval est effectuée en fonction de la destination des produits et conformément à des taux d'affectation $\gamma_i^{j,j=1,...,n}$ fixés ou calculés selon l'objectif recherché par le distributeur.

Tout comme le cas de la convergence, la divergence des flux à travers cette structure de distribution ne change pas les caractéristiques des produits du flux. Contrairement à l'acteur de désassemblage, les produits entrant et sortant de la structure de distribution divergente sont les mêmes. D'un point de vue quantitatif, le flux est soumis à la loi de conservation de la

matière. Ainsi, la quantité de produits du flux entrant au stock de réception du distributeur est égale à la somme de celles des flux sortant de la zone de stockage de ce distributeur.

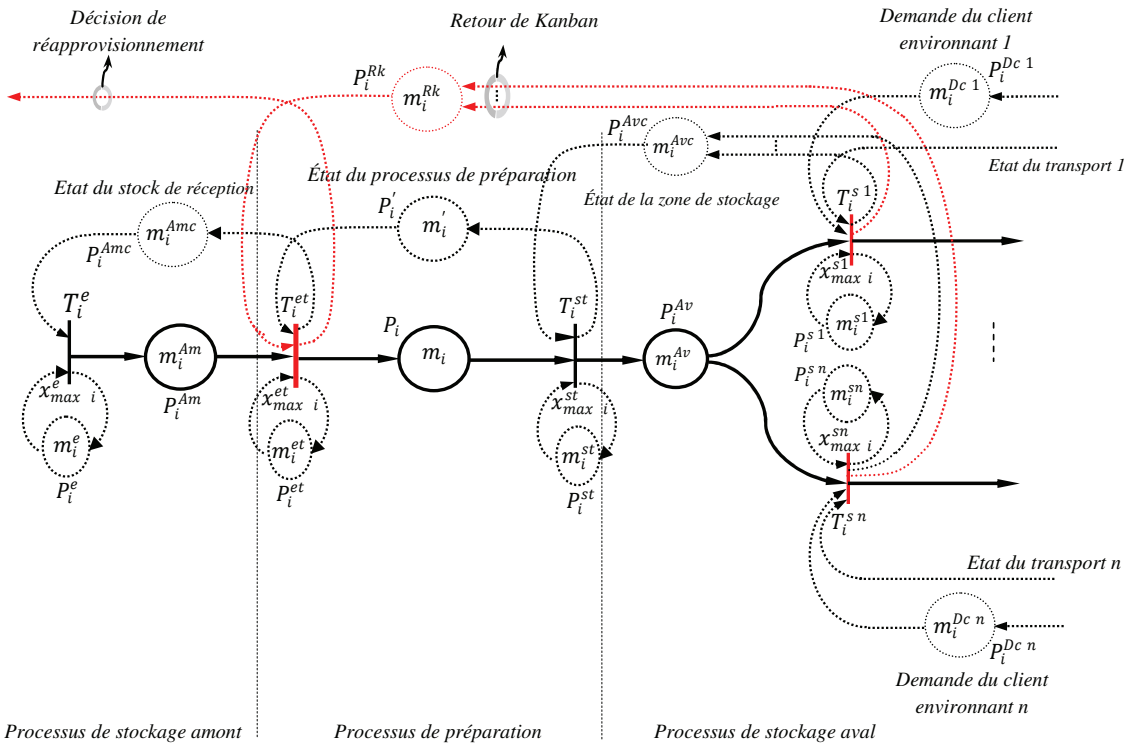


Figure III.22 *Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est divergente.*

La conservation des quantités de produits au niveau de la zone de stockage correspond à l'équation d'évolution du marquage de la place P_i^{Av} du modèle RdPCV de la structure de distribution divergente de la figure III.22:

$$\frac{dm_i^{Av}(t)}{dt} = x_i^{st}(t) - \sum_{j=1}^{n} x_i^{sj}(t) \qquad \text{(III.31)}$$

$x_i^{sj}(t), j = 1, \dots, n$: représente les flux de produits sortant à un instant donné de la zone de stockage de l'entrepôt. Ces flux rejoignant les clients aval sont calculés, chacun, en fonction de la demande du client correspondant et selon la disponibilité des produits dans la zone de stockage du distributeur considéré sans oublier bien sûr les conditions physiques du transport en aval. Ce calcul tient compte des fractions de répartition décrivant la partie de produits effective pour chaque client aval. Par conséquent, le flux global sortant de la zone de stockage n'est que la somme de ces flux calculés comme suit :

$$x_i^{s\,j}(t) = x_{max\ i}^{s\,j}.min\,(\ \alpha_i^{s\,j}\ ,\ m_i^{AvT}(t),\ m_i^{Tcj}(t),\ m_i^{Dcj}(t)) \quad \forall\, j, j = 1, \dots, n \quad \text{(III.32)}$$

où $m_i^{Tcj}(t)$ est la quantité instantanée d'emplacements libres prévus pour les produits à transporter vers le client *j*. Il traduit l'état du transport qui assure la livraison des produits au client *j*. $m_i^{Dcj}(t)$ représente la demande instantanée en attente (non encore servie) transmise par le client *j*. $m_i^{AvT}(t)$ *est donnée en fonction* des fractions de répartition du flux transitant par de la zone de stockage entre les différents flux sortant de ce dernier :

$$m_i^{AvT}(t) = \sum_{j=1}^{n} \gamma_i{}^j m_i^{Av}(t) \qquad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.33)}$$

Quant aux $\gamma_i^{j,j=1,\dots,n}$, ils représentent les fractions de répartition décrivant la façon dont la quantité de produits disponibles dans la zone de stockage du distributeur est répartie entre les clients aval. Ces taux satisfont aux conditions suivantes :

$$\begin{cases} 0 \leq \gamma_i^{j,\ j=1,\dots,n} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^{n} \gamma_i^{j} = 1 \end{cases} \qquad \text{(III.34)}$$

Notons ici que les taux d'affectation $\gamma_i^{j,j=1,\dots,n}$ sont calculés d'une manière similaire à celle décrite pour calculer les facteurs de priorité dans la section précédente.

c. Typologie de distribution convergente/divergente

Toute autre combinaison des deux structures de base, convergente et divergente, présentées ci-dessus est possible. Ainsi, un distributeur peut impliquer, à travers une structure convergente/divergente, des entrées venant de plusieurs producteurs (clients fournisseurs) et des sorties allant vers plusieurs clients (cf. figure III.20-c-).

Dans ce cas, plusieurs flux de produits arrivent au stock de réception de l'entrepôt en provenance de plusieurs producteurs. Ces produits sont ensuite transférés afin qu'ils soient préparés et conditionnés. Une fois préparés, ces produits sont placés dans la zone de stockage avant d'être expédiés vers plusieurs clients en aval conformément à des taux d'affectation sur ces clients.

Une telle configuration est caractérisée par :

- L'égalité de la somme des flux de produits sortant de la zone de stockage et la somme des flux entrant au stock de réception de l'entrepôt ;
- La satisfaction des conditions de partage d'emplacements disponibles du stock de réception de l'entrepôt par les différents flux entrant ;

- La satisfaction des conditions de répartition de produits disponibles dans la zone de stockage de l'entrepôt entre les différents clients aval.

Pour la modélisation RdPCV de cette structure (cf. figure III.23), l'arrivée des flux de produits au stock de réception de l'entrepôt, en provenance de plusieurs producteurs, est assurée par une place à différentes transitions d'entrées, conformément au cas de la structure convergente vu précédemment (cf. figure III.21). Quant à la répartition de ces flux de produits dans la zone de stockage sur plusieurs clients en aval, nous la formalisons à travers une place à différentes transitions de sortie, conformément au cas de la structure divergente de la figure III.22.

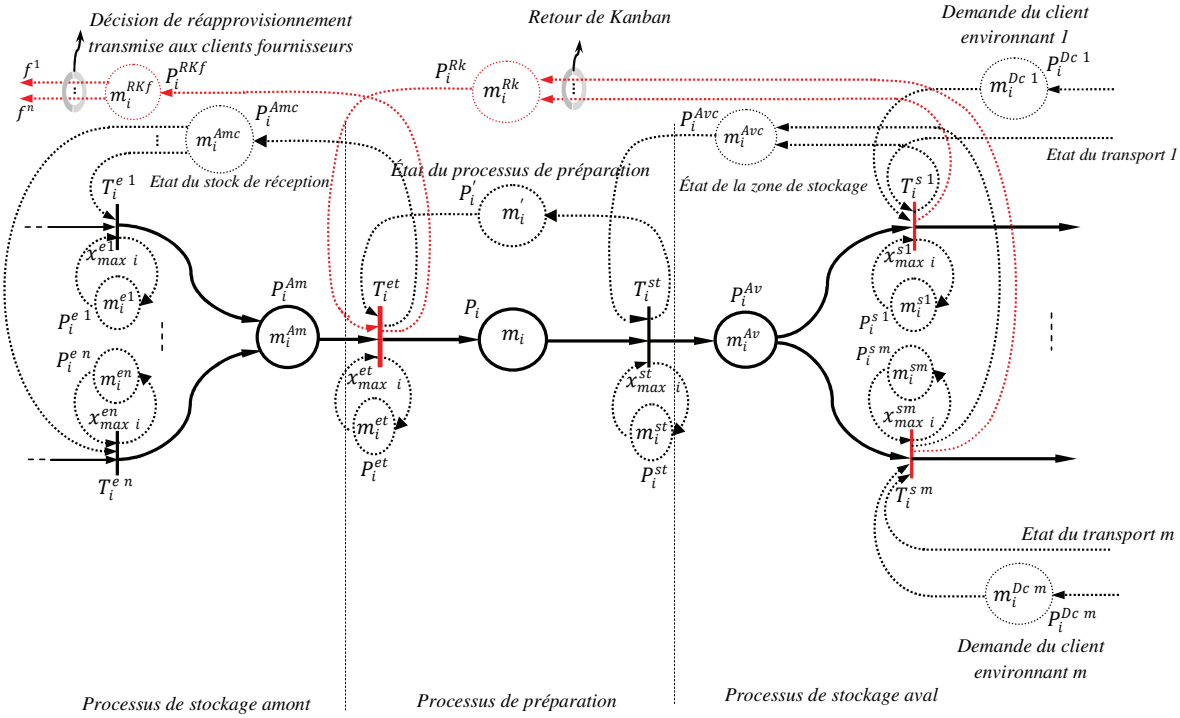


Figure III.23 *Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec un entrepôt dont la structure de distribution est convergente / divergente.*

B. Modèle RdPCV de l'acteur distributeur avec une plate-forme

Contrairement au distributeur avec entrepôt qui a pour vocation de stocker pendant un certain temps les produits, le distributeur avec une plate-forme est un lieu dans lequel des produits qui arrivent en provenance de plusieurs producteurs sont immédiatement transbordés, après tri et éventuel reconditionnement, sur d'autres moyens de transport plus légers pour la distribution finale à des clients différents ou à des unités industrielles différentes. Une plate-forme n'a pas ainsi pour vocation de constituer un stock, ce n'est pas un entrepôt, mais simplement un lieu destiné à faciliter les transferts entre moyens de transport.

Bien que son modèle RdPCV (cf. figure III.24) intègre le processus de préparation tout en tenant compte de la convergence des flux de produits ainsi que leur divergence de ce processus, toutefois il ne présente aucun processus de stockage. Ainsi ce modèle est similaire à celui de la structure de distribution convergente/divergente mais sans stock amont ni stock aval. La politique Kanban limite ici les en-cours de préparation et empêche que les produits arrivant en provenance de différents producteurs n'atteignent des niveaux anormalement élevés devant la plate-forme.

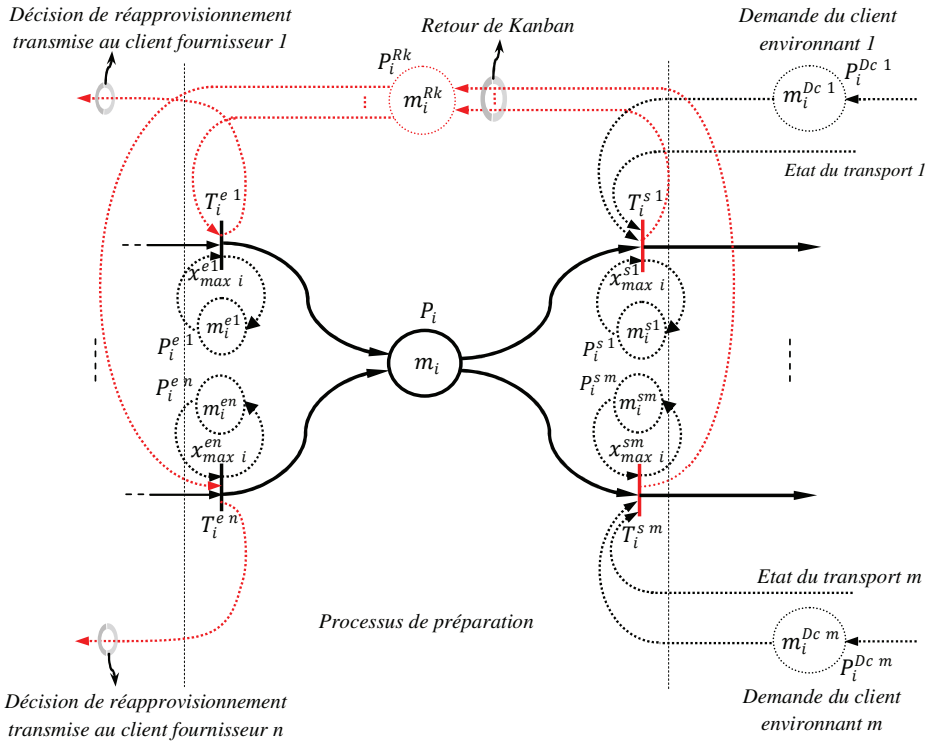


Figure III.24 *Modèle RdPCV d'un acteur distributeur avec une plate-forme.*

5.1.3.4 Cas de l'acteur client final

Les acteurs clients finals sont généralement les nœuds du réseau, où les opérations de transport des flux de produits touchent à leurs fins [Ding et al., 2004]. A l'inverse de l'acteur fournisseur qui constitue le point où les flux de matières sont initiés dans la CL, l'acteur client final constitue le point où les flux de produits finis sont absorbés. D'un autre côté, l'acteur client final forme la source où les demandes en produits sont initiées dans la CL. En tenant compte de sa spécificité, son modèle RdPCV (cf. figure III.25) est instancié du modèle RdPCV de l'acteur générique que nous avons présenté dans la figure III.13. En effet, le comportement dynamique du client final est caractérisé par deux processus qui sont complètement séparés l'un de l'autre. Il s'agit du processus de consommation au niveau physique et du processus de génération de demandes au niveau décisionnel (cf. figure III.25).

Les deux transitions T_i^e et T_i^e, délimitant le processus de consommation, représentent respectivement l'arrivée des produits commandés et leur consommation par le client. Le marquage $m_i(t)$ de la place P_i représente la quantité de produits mise à disposition pour la consommation du client. Cette place P_i doit être capable d'accueillir le flux de produits sans qu'il se répercute sur le fonctionnement du transport amont, ce qui n'est possible qu'à travers l'extension de la capacité de cette place vers l'infini ($C_i \to \infty$). Concernant le processus de génération de demandes, il est matérialisé à travers la transition T_i^{Gd} et la place P_i^{Dc}. A cet égard, la transition T_i^{Gd} permet de matérialiser les décisions à prendre par le client final pour passer commande (demande). Cette demande est générée à travers le franchissement de la transition. Nous supposons que chaque client génère la demande pour un seul type de produits finis. La fréquence de lancement de cette demande $x_{max\ i}^{Gd}$ peut être considérée constante ou suit une certaine loi de probabilité donnée (comme par exemple la distribution exponentielle). Cette demande peut être aussi modélisée par une série d'ordres donnée (en quantités et en fréquences), obtenue grâce aux informations historiques sur cette demande. Dans un contexte de fonctionnement en flux tiré, par Kanbans, pour l'intégralité de la CL, la demande du client final générée remonte de proche en proche le long de la chaîne en déclenchant les actions adaptées (ordres de réapprovisionnement, de transformation, de livraison, etc.). Quant à la place P_i^{Dc}, elle cumule la quantité de la demande générée par la transition T_i^{Gd} et qui n'est pas encore servie. Pour préciser la quantité de produits à commander à la fois par le client, la transition T_i^{Gd} est associée à la place P_i^{Gd} qui permet de définir le nombre de franchissements simultanés de la transition.

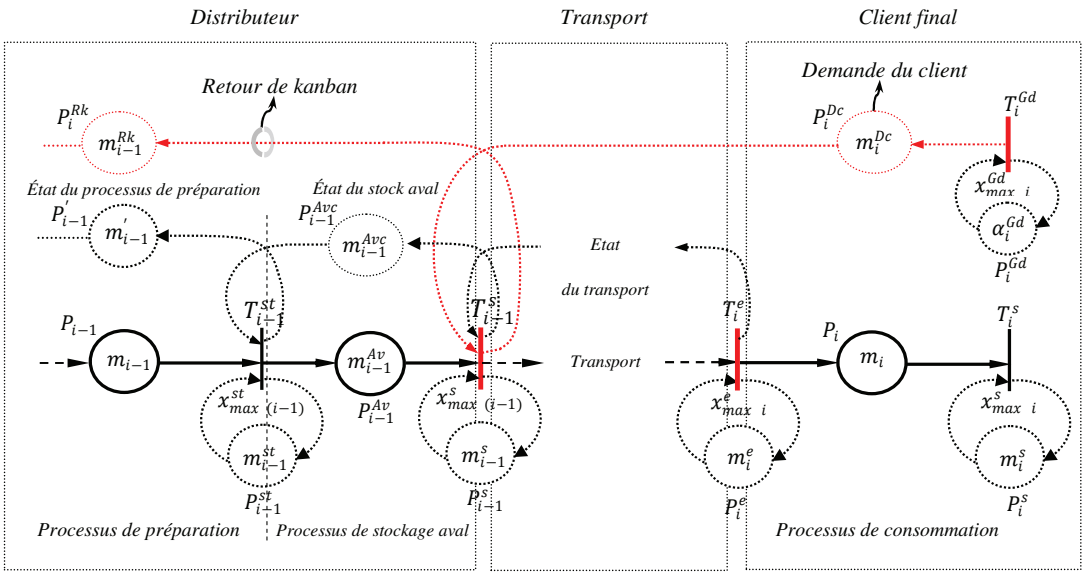


Figure III.25 *Modèle RdPCV d'un client final en interaction avec son environnement dans la CL.*

5.1.4 Prise en considération du cas multi-produit

Les modèles RdPCVs de différents acteurs de la CL décrits précédemment pour le cas mono-produit, peuvent être généralisés au cas multi-produit dont les flux de produits à traiter peuvent être de différents types. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir distinguer l'opération par type de flux de produits traité sur chaque ressource dans la CL afin de répartir sa capacité selon le type de flux. Par conséquent, les différents processus traitant chacun un type de flux différent, dans la CL, peuvent partager les mêmes ressources. Dans ces conditions, les capacités de ces ressources de traitement doivent être réparties, suivant des pourcentages constants ou variables au cours du temps, sur les différents flux que traitent ces ressources.

Nous considérons un acteur capable de transformer différents types de flux de produits. Plutôt que de décrire un fonctionnement discret où l'acteur transforme les différents flux en série (un par un), il est possible d'adapter une vision plus globale du fonctionnement où l'acteur transforme en parallèle, d'une manière continue, tous les flux de produits [Brinuaux, 2000]. Le modèle RdPCV de tel acteur est donné dans la figure III.26. Ce modèle se caractérise par la présence :

- de différents stocks amont, représentés par les places $P_i^{Am\ j}, j = 1, \dots, n$, dans lesquels sont déposés les produits approvisionnés en provenance des acteurs amont en attendant leur transformation. Chacun de ces stocks amont ne peut contenir qu'un seul type de produits $j, j = 1, \dots, n$;
- de différents stocks aval, représentés par les places $P_i^{Am\ j}, j = 1, \dots, n$, dans lesquels sont déposés les différents types de produits issus du processus de transformation en attendant leur livraison aux clients aval. Chacun de ces stocks aval ne peut contenir qu'un seul type de produits $j, j = 1, \dots, n$. Par conséquent, le nombre des stocks amont est le même que celui des stocks aval ;
- d'un processus qui permet de procéder à la transformation en parallèle de tous les types de produits mis en provision dans les différents stocks amont. Cela est possible à travers la répartition instantanée de la capacité globale disponible $m_i'(t)$ de l'ensemble des ressources intervenant dans le processus de transformation entre ces différents types de produits. Cette répartition est effectuée conformément à des taux d'affectation $\beta_i^{j,j=1,\dots,n}$ calculés selon l'objectif recherché par l'acteur comme nous l'avons présenté déjà pour l'acteur distributeur (cf. section § 5.1.3.3). Toutefois, quelque soit l'objectif recherché par l'acteur, la totalité des différents types de flux de produits mis en transformation, à

un instant donné, ne peut jamais dépasser cette capacité globale disponible $m_i'(t)$ du processus de transformation.

A cet égard, lorsqu'une décision de transformation d'un type de flux de produits se présente, elle autorise son engagement dans le processus de transformation, à condition toutefois que la capacité du processus le permette, tout en tenant compte du taux d'affectation β_i^j, et à condition que le stock amont correspondant à ce type de flux de produits ne soit pas vide. Cet engagement est matérialisé sur le modèle RdPCV de l'acteur (cf. figure III.26) par le franchissement de la transition T_i^{etj} correspondante dont la vitesse $x_i^{et\,j}(t)$ est décrite par la relation :

$$x_i^{etj}(t) = x_{max\ i}^{etj} . min\ (\ \alpha_i^{etj}\ , m_i^{Amj}(t),\ m_i'(t), m_i^{Rkj}(t)) \tag{III.35}$$

où $m_i'(t)$ *est donnée en fonction* des taux d'affectation β_i^j :

$$m_i'(t) = \beta_i^j\ (C_i - \sum^{n} m_i^j(t)) \tag{III.36}$$

$\beta_i^{j,j=1,\dots,n}$: sont des fractions de répartition (ou encore taux d'affectation) décrivant la façon dont la capacité instantanée disponible du processus de transformation est partagée entre les différents types de flux mis en transformation. Ces facteurs satisfont aux mêmes conditions que nous avons présentées précédemment pour le cas d'un distributeur.

La conservation des quantités des différents types de produits stockés et transformés par l'acteur *i* correspond aux équations d'évolution du marquage des places P_i^{Amj}, P_i^j et P_i^{Avj} du modèle RdPCV de l'acteur de la figure III.26:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{m}_i^{Amj}(t) \\ \dot{m}_i^{j}(t) \\ \dot{m}_i^{Avj}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^{ej}(t) \\ x_i^{etj}(t) \\ x_i^{stj}(t) \\ x_i^{sj}(t) \end{bmatrix} \qquad \forall j, j = 1, \dots, n \tag{III.37}$$

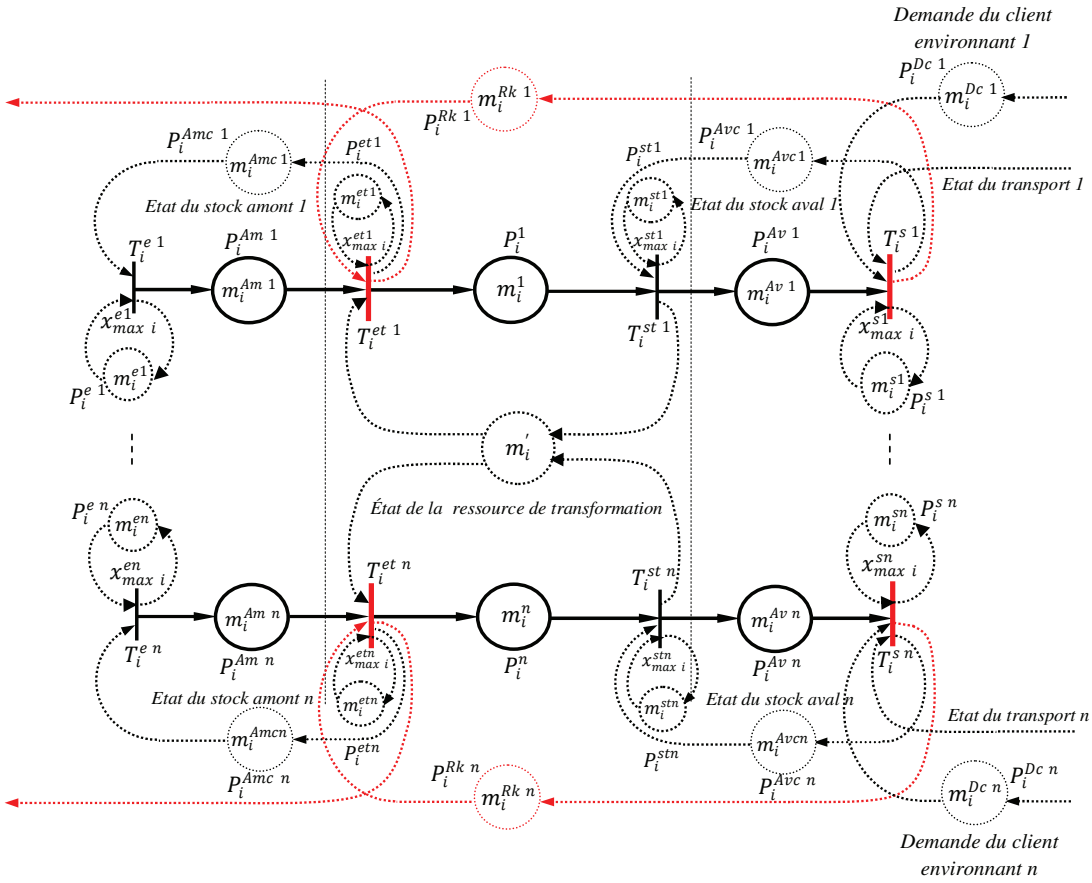


Figure III.26 *Modèle RdPCV d'un acteur capable de transformer différents types de flux de produits dans la chaîne logistique.*

La modélisation des différents nœuds (acteurs) de la CL étant faite, nous allons maintenant nous intéresser à la modélisation des arcs assurant leur interconnexion dans la chaîne.

5.2 Modèles RdPCVs des arcs de la chaîne logistique

Les différents arcs de la CL permettent d'assurer à chaque acteur dans cette dernière ses approvisionnements (flux d'entrée) et ses livraisons (flux de sortie) à travers la mise en œuvre de ses contacts amont et val. En effet, ces arcs servent à lier chaque acteur dans la CL, à ses fournisseurs et à ses clients, traduisant, par conséquent, les interactions entre les différents acteurs dans la chaîne. Ces arcs sont matérialisés par des liaisons d'échanges informatiques au niveau informationnel (échanges d'informations renseignant sur les demandes, les commandes, la disponibilité d'emplacements, les capacités, etc.) et par des connexions de transport au niveau physique.

Comme nous avons déjà abordé le problème d'échange informationnel, où nous avons identifié les différents types d'informations sur lesquelles se basent les systèmes de pilotage dans la CL pour prendre les décisions, nous nous attacherons ici à décrire les vecteurs de

transport. Ces vecteurs délimitent tout acteur dans la CL et assurent à tous les tissus de cette dernière un transfert continu du flux physique formant, par analogie avec l'organe vivant, le système circulatoire du corps de la chaine logistique [Benmansour, 2009].

Il convient ici d'insister sur l'importance de prendre en considération ces vecteurs de transport dans la modélisation de la CL. En effet, ces vecteurs jouent un rôle critique dans la gestion d'une CL, où leur valeur s'incorpore au coût total du produit, au délai de livraison, à la gestion des stocks, à la localisation géographique des fournisseurs, etc. [Aguezzoul et al., 2005]. En outre, l'opération de transport se déroule dans le temps, et le temps de transport s'incorpore intégralement dans le cycle de rotation d'un produit, depuis l'engagement de sa fabrication jusqu'à sa livraison au client final. L'influence du transport sur la gestion est donc double, jouant à la fois sur le coût du produit et sur le volume du capital engagé [Savy, 2007].

Malgré l'importance et la nécessité de tenir compte de cet aspect de transport dans la modélisation globale de la CL, très peu de travaux ont été menés dans ce sens où la plupart des travaux dans la littérature traitent cet aspect de manière superficielle en attribuant des valeurs constantes pour les temps de transport [Viswanadham et Srinivasa Raghavan, 2000].

En réponse à cette carence, nous tenons compte dans notre modèle RdPCV de la CL, de l'écoulement des flux de produits à travers les vecteurs de transport. L'adoption d'un même modèle modulaire pour la CL dans sa globalité, permet de décrire de manière homogène à la fois la dynamique des nœuds (acteurs) et celle des arcs (vecteurs de transport), ce qui offre une plus grande simplicité et une grande unité en comparaison avec les modèles existant.

Nous présentons dans cette section un modèle RdPCV décrivant le comportement dynamique de l'écoulement du flux de produits à travers les arcs (vecteurs de transport) de la CL. Pour des raisons de simplicité, à chaque connexion entre deux acteurs dans la CL est associée une structure de transport suffisamment macroscopique pour servir de base à la présentation des différents modes de transport, à savoir : routier, ferroviaire, aérien, fluvial et maritime. Nous supposons également que chaque acteur est responsable du transport des produits à ses acteurs clients en aval. Par conséquent, les demandes de réapprovisionnement de produits sont gérées au niveau des acteurs et non pas au niveau du transport.

Dans cette structure, la connexion entre deux acteurs est assurée à travers une infrastructure et un ensemble de véhicules. L'infrastructure est constituée d'une voie ou d'un support de déplacement (route, voie ferrée, canal, fleuve, ...) qui permet de relier les deux acteurs interagissant. Cette infrastructure est caractérisée par un certain nombre de paramètres dont les plus importants sont le type du support (route, voie ferrée, canal, fleuve, ...), sa

longueur, sa capacité d'écoulement, sa vitesse maximale de déplacement ou le temps de parcours minimum pour le traverser. Cette vitesse limitée est par exemple déterminée en fonction du type de l'infrastructure et des limitations imposées par des règles associées à ce type (ex. code de la route pour le type de déplacement en route,…). Quant aux véhicules, ils représentent le moyen de transport qui assure l'acheminement des produits à partir du stock aval de l'acteur fournisseur jusqu'au stock amont de l'acteur client. Généralement, le nombre des véhicules servant dans une telle connexion des acteurs est limité et l'utilisation de chaque véhicule est conditionnée par sa capacité de chargement. Dans ce cas, faire des allers-retours par ces véhicules afin de satisfaire les demandes de transport peut être nécessaire. Ainsi, lorsqu'une demande de transport d'un lot de produits vers un acteur en aval se présente, deux cas sont possibles : si le moyen de transport est disponible, la demande est immédiatement prise en charge et le lot est mis en route vers cet acteur en aval. Par contre, si le transport est déjà occupé, la demande est préparée et le lot est mis en attente jusqu'au retour des véhicules.

Le modèle RdPCV représentant le vecteur de transport doit satisfaire la loi de conservation du flux de produits ainsi que du flux de véhicules transportant ces produits.

Dans ce modèle (cf. figure III.27), l'infrastructure reliant deux acteurs interagissant est représentée par deux places P_i^t et P_i^{Rt} dont le marquage m_i^t représente le nombre de véhicules chargés en déplacement sur l'infrastructure de l'acteur amont vers l'acteur aval et le marquage m_i^{Rt} représente le nombre de véhicules vides en retour dans le sens inverse.

Le départ des véhicules de l'acteur amont et leur arrivée à l'acteur aval sont représentés respectivement par les transitions T_i^{tp} et T_j^e. Ces deux transitions sont associées respectivement aux places P_i^{tp} et P_j^e qui permettent de limiter leur nombre de franchissements simultanés. Les marquages de ces deux places traduisent respectivement le nombre maximal α_i^{tp} de véhicules pouvant quitter simultanément l'acteur amont, après avoir été chargés au même temps, et le nombre maximal α_j^e de véhicules pouvant être déchargés simultanément chez l'acteur aval. Ceci implique les invariants de marquage suivants:

$$\begin{cases} m_i^{tp}(t) = \alpha_i^{tp} \\ m_j^e(t) = \alpha_j^e \end{cases} \quad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.38)}$$

Quant à la transition T_i^{Dt}, elle représente l'arrivée des véhicules vides à l'acteur amont et, par conséquent, le marquage $m_i^{Dt}(t)$ correspond à la quantité de véhicules disponibles, à

un instant donné *t*. Par conséquent, les marquages $m_i^t(\mathrm{t}), m_i^{Rt}(\mathrm{t})$ et $m_i^{\mathrm{Dt}}(t)$ constituent un invariant de marquage :

$$m_i^t(\mathrm{t}) + m_i^{Rt}(\mathrm{t}) + m_i^{\mathrm{Dt}}(t) = C_i^{\mathrm{t}} \quad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.39)}$$

où C_i^{t} est une constante représentant le nombre de véhicules réservés au transport des produits entre l'acteur amont et l'acteur aval.

Le passage de la vision flux de produits au flux de véhicules ou l'inverse est assuré à travers les poids de pondération assurant la continuité de passage des variables d'une vision à une autre dont un flot de Q_t produits correspond à un véhicule.

La conservation du flux de produits est assurée à travers la boucle Kanban. Ainsi :

$$m_i^{\mathrm{C}}(\mathrm{t}) + Q_t * m_i^t(\mathrm{t}) + m_j^{\mathrm{Am}}(t) + m_i^{\mathrm{Rk}}(t) = k_i^{\mathrm{t}} \quad \forall\, t \geq 0 \qquad \text{(III.40)}$$

Nous insistons ici sur l'importance de tenir compte de la vision flux de véhicules dans notre modèle RdPCV de la CL. En effet, cette vision permettra de décrire le transport des produits sur une infrastructure en fonction de l'état de tout le trafic de véhicules sur cette dernière, ce qui constitue une de nos principales perspectives de recherche.

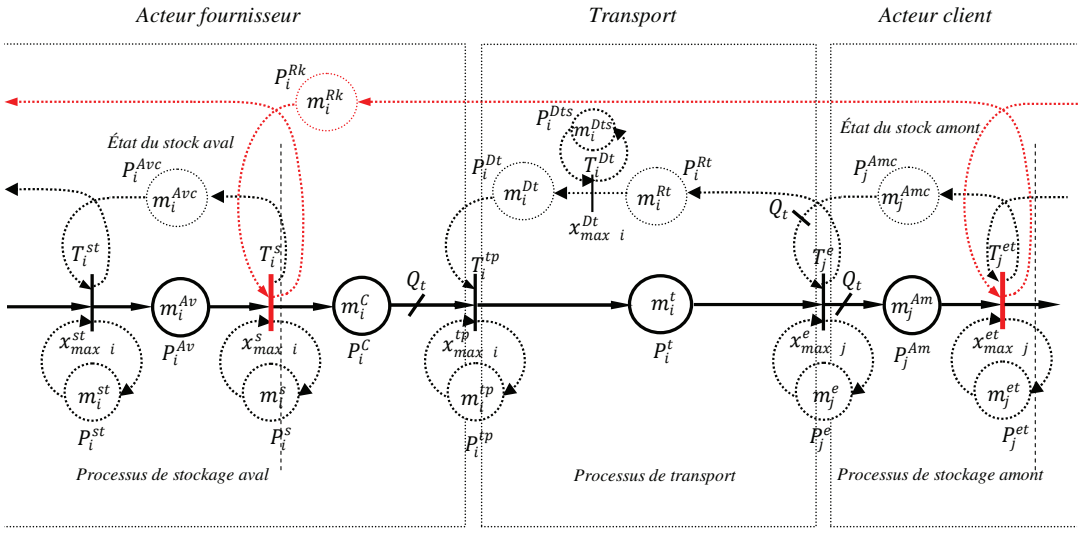


Figure III.27 *Modèle RdPCV du transport en interaction avec son environnement dans la chaîne logistique.*

La modélisation des différents nœuds et arcs de la CL étant faite, nous allons maintenant nous intéresser à l'obtention du modèle global de cette chaîne.

5.3 Modèle RdPCV globale de la chaîne logistique

Le modèle RdPCV global de la CL peut être obtenu par l'assemblage de l'ensemble des modèles RdPCVs élémentaires associés aux nœuds et aux arcs que nous avons proposés ci-dessus. Toutefois, cet assemblage doit assurer la cohérence des différents modèles RdPCVs

élémentaires, tout en en respectant une logique de cheminement des flux de produits dans la CL. En effet, les acteurs définis de la CL ne peuvent pas s'enchainer dans n'importe quel ordre. Des règles d'assemblage doivent être respectées dans ce cadre. Ces règles assurent la succession cohérente des différents modèles RdPCVs élémentaires développés afin de construire le modèle global RdPCV de la CL. Dans ce paragraphe, nous définissons ces règles de construction comme suit:

- ✓ L'acteur fournisseur doit obligatoirement précéder tout autre acteur dans la CL ;
- ✓ L'acteur client final doit être obligatoirement précédé par tout autre acteur dans la CL ;
- ✓ Le transport doit être le prédécesseur de tout acteur dans la CL à part le fournisseur ;
- ✓ Le transport doit être le successeur de tout acteur dans la CL à part le client final. Par déduction, tout acteur dans la CL, à part le fournisseur et le client final, doit être délimité par deux vecteurs de transport amont et aval ;
- ✓ Tout acteur dans la CL peut être relié par le vecteur de transport avec un autre acteur selon les règles précisées dans le tableau III.1 ci-dessous :

<table>
<tr><th>Acteurs amont possibles</th><th>Type d'acteur</th><th>Acteurs aval possibles</th></tr>
<tr><td>Aucun</td><td>Fournisseur « acteur type A »</td><td rowspan="5">B, C, D, E, F.</td></tr>
<tr><td rowspan="5">A, B, C, D, E.</td><td>Fabricateur « acteur type B »</td></tr>
<tr><td>Assembleur « acteur type C »</td></tr>
<tr><td>Désassembleur « acteur type D »</td></tr>
<tr><td>Distributeur « acteur type E »</td></tr>
<tr><td>Client final « acteur type F »</td><td>Aucun</td></tr>
</table>

Tableau III.1 *Règles de successions utilisées pour construire le modèle RdPCV global de la chaîne logistique.*

Le modèle RdPCV global de la CL construit permet de représenter conjointement avec l'écoulement du flux physique au sein de la CL, l'échange informationnel et décisionnel des différents acteurs de cette chaîne. Il se doit, dans la mesure du possible :

- générer le flux d'information au niveau des acteurs situés le plus en aval dans la CL qui sont les clients finaux ;
- propager ce flux en remontant des commandes tout au long de cette chaîne ;

- faire disparaitre les commandes arrivant aux acteurs situés le plus en amont dans la chaîne, qui sont les fournisseurs de matières premières, et faire les remplacer en générant à leur place des matières premières ;
- transporter ces matières premières générés vers différents endroits dans la chaîne ;
- transformer ces matières, en invoquant des processus de fabrication, d'assemblage ou/et de désassemblage ;
- faire transporter les produits issus des différents processus de transformation vers d'autres endroits dans la CL afin de les préparer et les reconditionner avant d'être répartis sur plusieurs destinations ;
- enfin de faire disparaitre les produits arrivant aux endroits représentant leurs destinations finales dans la CL, la où sont générés les flux d'information.

Un tel modèle apporte à l'exploitant une vision globale plus claire de l'état de la CL en décrivant les principaux processus des différents acteurs dans cette chaîne et les interactions entre ces acteurs qui correspondent aux différents échanges physiques et informationnels pouvant être effectués.

Un des avantages significatifs de ce modèle est son langage graphique naturel qui facilite la représentation et l'analyse des différents phénomènes et aspects de la chaîne logistique. Ce langage permet aussi de déduire l'équation fondamentale (ou l'équation d'état) permettant, à son tour, de décrire la dynamique globale de la chaîne logistique à travers la description de l'évolution continue, au cours du temps, des états des différents flux (physique et informationnel) au sein de la CL.

Concrètement, ces états (ou composantes du vecteur de marquage) définissent le niveau du stock amont, les en-cours de transformation et le niveau du stock aval de chaque acteur de la CL ainsi que les niveaux d'accumulation des différentes demandes clients et les quantités de véhicules en cours de transportation des produits entre ces différents acteurs de la CL. Ce sont des caractéristiques qui témoignent effectivement de l'état global de la CL. Une telle représentation est très utile non seulement pour la simulation de l'écoulement des différents flux dans la CL, mais également pour l'évaluation de l'impact d'une action d'exploitation sur les conditions de cet écoulement, et ainsi pour mettre en place des stratégies efficaces de son pilotage et son fonctionnement optimal.

6. CONCLUSION

Pour répondre à certains des principaux problèmes de la chaîne logistique tout en adoptant la vision globale exigée par le concept du SCM « Supply Chain Management », nous avons proposé une approche continue de modélisation dynamique globale de la chaîne logistique tout en nous fondant sur le potentiel des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable (RdPCV). A travers cette approche de modélisation, nous ne cherchons pas à décrire le comportement de la chaîne logistique au niveau de ses ressources mais plutôt au niveau de ses processus traduisant ainsi un niveau macroscopique qui permet d'obtenir une vision du fonctionnement globale et tendancielle de la CL. Une telle approche ne s'intéresse pas au comportement individuel de chacun des produits au sein de la CL, mais plutôt à leur évolution moyenne. Elle s'inspire principalement des phénomènes physiques d'écoulement des fluides. Vu la complexité et la grande diversité de la CL, nous avons procédé à cette approche de modélisation par une démarche, à la fois, modulaire et générique tout en introduisant des concepts issus de l'approche systémique. En effet, nous considérons la CL comme un système complexe. Ce système fonctionne selon une logique de réseaux, composés de nœuds interconnectés par des arcs où les nœuds représentent les différents acteurs de la CL et les arcs représentent les vecteurs de transports et d'échanges informationnels reliant les acteurs. Chaque acteur est un système ouvert sur son environnement (acteurs clients et acteurs fournisseurs) avec lequel il échange le flux physique et le flux d'information. Nous considérons cet acteur, selon l'approche systémique, comme une composition de :

- sous-système physique qui peut être vu comme un réseau de ressources élémentaires en interaction entre elles invoquant deux processus de stockage, amont et aval, et également un processus de transformation qui se charge de la fonction principale de l'acteur consistant à amener des modifications dans les caractéristiques du flux de produits pour atteindre, au final, les valeurs attendues par les clients du contact aval de l'acteur considéré.
- et sous-système de pilotage qui sert à adapter l'acteur à son environnement en générant un plan d'action autour de trois principaux engagements : transformation, livraison et réapprovisionnement tout en tenant compte de l'état du sous-système physique de l'acteur considéré, de l'état de son transport, des demandes de ses clients environnants et des politiques de pilotage adoptées.

Ce cadre architecturel propre à tous les acteurs de la CL, montre bien que ces acteurs ont une structure comparable, même s'ils s'articulent différemment et génèrent des flux de volumes et de fréquences différents.

A chaque connexion entre deux acteurs est associée une structure de transport suffisamment macroscopique pour servir de base à la présentation des différents modes de transport. Dans cette structure, la connexion entre deux acteurs est mis en œuvre à travers une infrastructure et un ensemble de véhicules assurant l'acheminement des produits à partir du stock aval de l'acteur fournisseur jusqu'au stock amont de l'acteur client.

C'est sur la base de ces concepts génériques que nous avons développés les modèles RdPCVs élémentaires associés aux acteurs et aux vecteurs de transport de la CL. D'un côté, le modèle RdPCV de l'acteur permet de décrire le comportement dynamique des flux transitant par l'acteur ainsi que l'interaction de ce dernier avec son environnement (ses contacts amont et aval). Autrement dit, le modèle RdPCV de l'acteur doit expliciter :

- l'organisation des différents processus au niveau du sous-système physique ;
- l'ensemble des informations émises en direction du sous-système de pilotage;
- les principaux engagements de ce sous-système de pilotage envers l'environnement et le sous-système physique ;
- et la politique de pilotage de flux adopté par l'acteur permettant de déterminer quand et pour quelle quantité envisager un engagement.

Tenant compte des spécificités de certains acteurs de la CL, différentes extensions du modèle RdPCV de l'acteur ont été développées. D'un autre côté, le modèle RdPCV du transport permet d'assurer le transfert des produits à travers l'infrastructure de transport tout en tenant compte de la vision flux de véhicules au lieu de celui de produits. En effet, cette vision permettra de décrire le transport des produits sur une infrastructure en fonction de l'état de tout le trafic de véhicules sur cette dernière.

Le modèle RdPCV global de la CL peut être obtenu par l'assemblage de l'ensemble des modèles RdPCVs élémentaires associés aux acteurs et aux vecteurs de transport tout en respectant la succession cohérente des différents modèles RdPCVs élémentaires.

Un tel modèle permet d'aborder les principaux aspects du SCM en appréhendant la CL sous ses différents aspects, qu'ils soient structurels, fonctionnels, comportementaux, informationnels et décisionnels. Il apporte aux décideurs responsables de la CL une lisibilité en terme d'analyse des interactions et donne une vision globale plus claire de l'état de la chaîne facilitant ainsi toute mesure d'exploitation, que ce soit au niveau stratégique, tactique ou un certain niveau opérationnel.

CHAPITRE IV

EXPLOITATION DU MODELE DEVELOPPE POUR L'ANALYSE DYNAMIQUE ET L'EVALUATION DE PERFORMANCE

Sommaire

1. INTRODUCTION 142
2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE 142
3. PRINCIPALES VARIABLES ET INDICATEURS MIS EN JEU PAR LE MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE 143
4. REPRODUCTION DU PHENOMENE DE L'ECOULEMENT DES FLUX DE PRODUITS ET D'INFORMATION DANS LA CHAINE LOGISTIQUE 144
5. EVALUATION DE PERFORMANCE DE LA CHAINE LOGISTIQUE 159

5.1 Sensibilité du réseau logistique étudié aux conditions initiales 160

5.2 Analyse des effets de la variation de la taille des boucles Kanbans 166

5.3 Analyse des effets de la variation de la vitesse de transport 169

5.4 Analyse des effets de la variation des demandes clients finaux 172

6. CONCLUSION 174

1. INTRODUCTION

Nous venons de détailler les différentes étapes qui nous ont permis de construire le modèle RdPCV global de la chaîne logistique. L'utilisation de ce dernier en phase d'exploitation et d'analyse suppose d'avoir au préalable, une confiance suffisante dans les résultats qu'il fournit. D'où l'importance de la phase de validation de ce modèle. En réalité, cette phase de validation du modèle a fait une partie intégrante de son processus de développement où nous avons procédé la modélisation de manière structurelle, graphique et modulaire facilitant ainsi la validation structurelle et mathématique des différents modèles élémentaires RdPCVs associés aux nœuds et aux arcs de la chaîne logistique. Dans cette section, nous apportons, dans un premier temps, des éléments pour une validation du comportement dynamique du modèle RdPCV global de la chaîne logistique que nous avons proposé, afin d'observer dans quelle mesure ce modèle est capable de reproduire les tendances observées sur le système réel. Dans un deuxième temps, nous illustrons l'intérêt du modèle dans l'évaluation de performance des chaînes logistiques. A cet égard, la richesse du modèle RdPCV global de la chaîne logistique permet d'évaluer aisément un grand nombre d'indices de performances de la chaîne. Ces études sont possibles à travers la simulation dont la mise en œuvre du modèle dans un contexte théorique est similaire à celui de la pratique afin de tester son comportement sur différentes configurations possibles.

2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Si le modèle RdPCV global de la CL consiste à établir une représentation simplifiée de l'écoulement des flux de produits, à travers les différentes installations de la CL en définissant des variables descriptives reliées par des équations mathématiques, la simulation revient à décrire la progression et l'évolution au cours du temps de ces variables permettant ainsi de rendre compte de l'état de la CL et de reproduire des situations observées. Toutefois, cette reproduction des situations n'est possible qu'à travers l'étape de la résolution du modèle. Pour assurer cette étape et faciliter la mise en œuvre du modèle, nous avons utilisé l'environnement de programmation MATLAB. Le modèle de simulation bénéficie de la richesse du modèle RdPCV global de la CL et de tous les avantages qu'il apporte pour une modélisation macroscopique, continue, modulaire et générique.

3. PRINCIPALES VARIABLES ET INDICATEURS MIS EN JEU PAR LE MODELE RDPCV GLOBAL DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Le modèle RdPCV global de la CL proposé étant un modèle continu et l'information prépondérante étant la dynamique du flux transitant par cette chaîne, l'ensemble des variables et des indicateurs qui seront exploités dans le modèle seront continus et représentés sous la forme de courbes évoluant en fonction du temps dans l'espace des réels. Ces variables et indicateurs mesurant le fonctionnement de la chaîne pouvent être visualiser directement sur le modèle RdPCV global de la CL. Parmi ces variables, nous pouvons visualiser, pour chaque acteur dans la CL, l'évolution au cours du temps de :

- La quantité de produits disponibles dans les stocks amont et aval ;
- La quantité d'emplacements disponibles dans ces deux stocks amont et aval ;
- La quantité de produits en cours de transformation (ou les en-cours de transformation) ;
- La quantité d'emplacements libres que peut utiliser encore le processus de transformation de chaque acteur ;
- Les débits d'approvisionnement et de livraison ;
- Le débit de transfert des produits du stock amont au processus de transformation ;
- Le débit de transformation ;
- Le débit de préparation des produits commandés avant d'être transportés chez les clients aval ;
- La quantité de véhicules chargés en déplacement sur l'infrastructure de transport ;
- La quantité de véhicules vides sur leur retour ;
- La quantité de véhicules disponibles pour le transport immédiat ;
- La demande en attente (non encore servie) transmise par des clients en aval;
- La décision de transformation qui traduit la quantité de produits effective devant être mise en transformation afin de remplacer la quantité de produits expédiée en aval ;
- La décision de réapprovisionnement qui traduit la commande à passer aux clients amont pour remplacer la quantité de produits mise en transformation ;
- La quantité de produits cumulée ou consommée par le client final.

La connaissance de ces variables permet de connaître l'état dynamique des différents flux transitant par la CL, traduisant ainsi le fonctionnement de cette dernière. Plusieurs autres indicateurs peuvent être déduits directement à partir de ces variables. Parmi eux, citons : le taux de service du client final, le temps d'attente des clients, le temps passé dans le réseau par un produit, le coût du réseau (défini, à son tour, en fonction du taux de service, temps de transport et niveau des stocks), etc.

Disposant de tous ces éléments essentiels pour notre étude, nous aborderons dans la section suivante l'analyse de la CL. Nous commencerons dans un premier temps par reproduire le comportement dynamique de l'écoulement des flux de produits dans la CL. Nous nous intéresserons ensuite, à l'évaluation de la performance.

4. REPRODUCTION DU PHENOMENE DE L'ECOULEMENT DES FLUX DE PRODUITS ET D'INFORMATION DANS LA CHAINE LOGISTIQUE

Le modèle RdPCV global de la CL proposé est appliqué dans cette section à un cas de CL issu de [Cheyroux, 2003]. Il s'agit d'une structure typique pour un réseau logistique : c'est-à-dire la structure la plus simple possible qui contient néanmoins les caractéristiques principales d'une CL (figure IV.1).

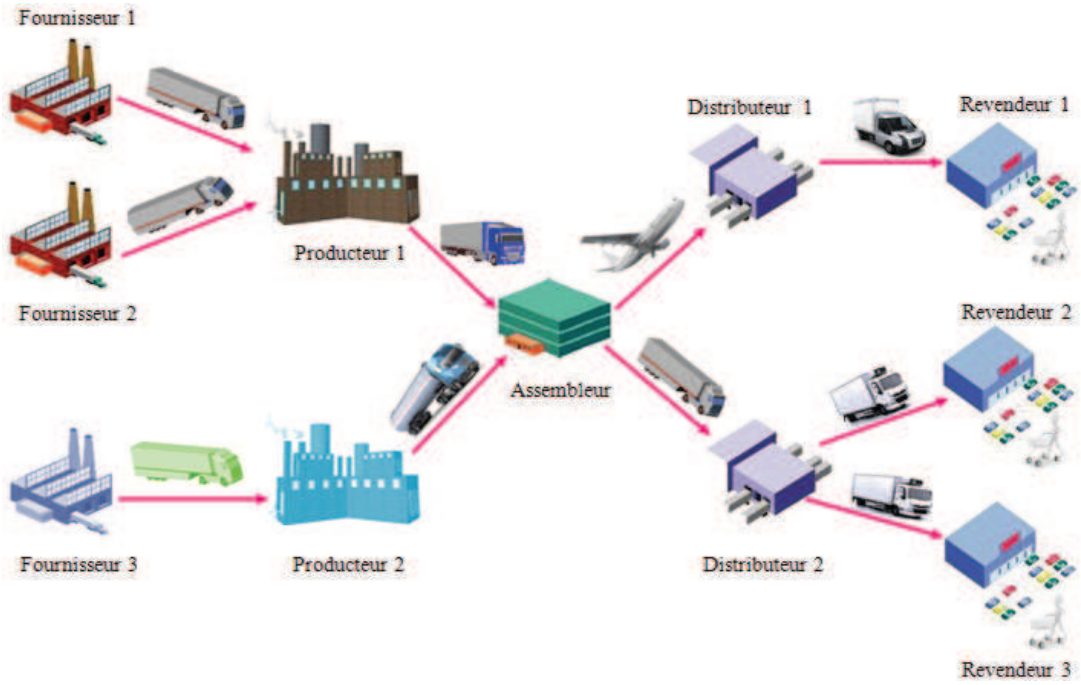


Figure IV.1 *Structure typique d'une chaîne logistique.*

Ce réseau est convergent en amont (partie fabrication) et divergent en aval (partie distribution). Il consiste en un acteur assembleur qui assemble des produits semi-finis fabriqués en amont par les producteurs 1 et 2. Le producteur 2 se procure sa matière première chez le fournisseur 3. Quant au producteur 1, il utilise les deux fournisseurs 1 et 2 pour obtenir sa matière première. Dans la partie aval de l'assemblage, les produits sont répartis entre deux centres de distribution 1 et 2, situés dans deux régions géographiques distinctes. Ces centres de distribution servent à approvisionner les revendeurs 1, 2 et 3 qui répondent à la demande de leur consommateur final. Nous considérons ici les revendeurs comme clients finaux de notre chaîne. Par conséquent, les demandes des consommateurs finaux sont prises en considération par les revendeurs dans leur décision de réapprovisionnement. Les liens entre tous ces éléments sont assurés par des moyens de transport. La chaîne est gérée pour son intégralité en flux tiré, par Kanbans. Notons que cette structure du réseau logistique n'est pas issue d'un cas industriel et qu'elle n'a aucune réalité physique. C'est simplement l'assemblage des caractéristiques essentielles de la plupart des CLs.

Le modèle RdPCV global de cette structure du réseau logistique est donné dans la figure IV.2. Puisque la taille des données du modèle étant importante, elles ne seront pas présentées dans leur ensemble. Nous présentons néanmoins les relations essentielles entre les différents acteurs de la CL. Nous considèrons que la CL est alimentée à travers les clients finaux par des demandes constantes dans le temps avec des fréquences relativement basses : $x_{max\,5}^{Gd1} = x_{max\,5}^{Gd2} = x_{max\,5}^{Gd3} = 1{,}2$ *p/u.t* (en produits/ unité de temps). D'un autre côté, l'écoulement des flux de produits entre les différents acteurs et à travers leur processus de transformation est caractérisé par les débits (taux) maximaux indiqués dans le tableau IV.1.

Les différents acteurs de la CL	Fournisseurs			Producteurs		Assembleur	Distributeurs		Liens de transport
	1	2	3	1	2	1	1	2	De 1 à 10
Débit maximal (*p/u.t*)	**10**	**10**	**10**	**5**	**5**	**3,8**	**7**	**10**	**0,5** (*véh /u.t*)

Tableau IV.1 *Caractéristiques de l'écoulement des flux de produits du réseau logistique de la figure IV.1.*

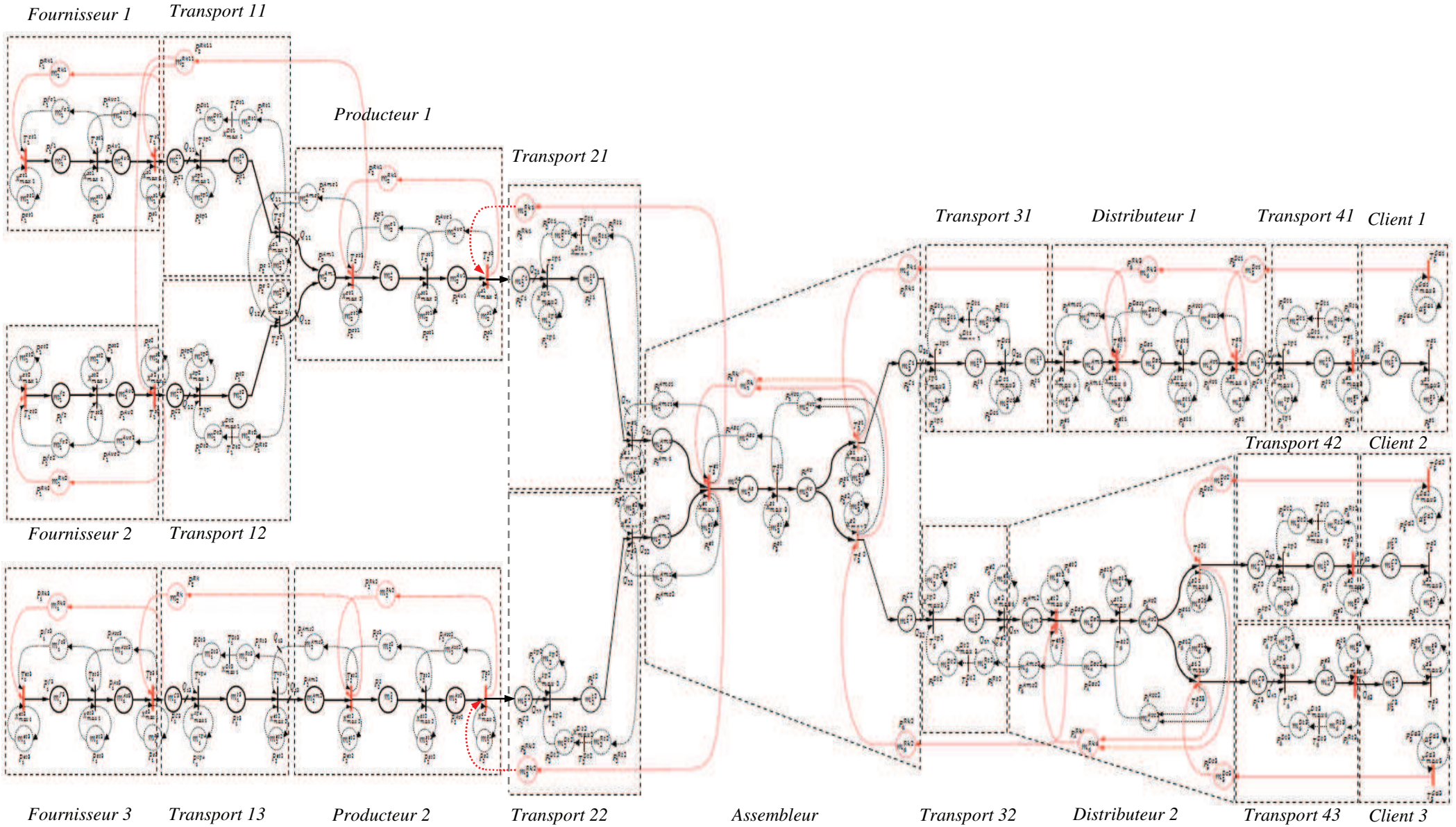


Figure IV.2 *Modèle RdPCV global de la chaîne logistique de la figure IV.1.*

Étant donné que la politique Kanban limite les valeurs des stocks, nous considérons ici que les capacités des différents stocks dans la CL sont suffisamment grandes (leurs valeurs C_i^{Amj} et C_i^{Avj} sont plus grandes que la constante de Kanban k_i) afin de montrer l'effet de cette politique. Par ailleurs, les fractions de répartition γ_1 et γ_2 entre les deux distributeurs (décrivant la façon dont la quantité de produits disponibles dans le stock aval de l'assembleur est répartie entre les deux distributeurs en aval) et les facteurs de partage β_1 et β_2 entre les deux flux entrant au stock amont du producteur 1 (décrivant la façon dont l'espace disponible du stock amont est partagé entre les deux flux entrant) sont ajustables et peuvent donc dépendre de l'objectif recherché par l'acteur assembleur ou producteur, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre III (cf. section § 5.1.3.3). Nous commençons dans un premier temps à respecter au mieux des répartitions initialement prévues « ratios » comme suit : $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\,, 0.6)$ et $(\beta_1, \beta_2) = (0.5\,, 0.5)$. Nous choisissons *50 Kanbans* dans chaque boucle ($k_i = 50\ \forall i$) dans toute la chaîne (nous revenons sur ce choix dans la section suivante). A partir d'un état initial équilibré du réseau logistique (répartition équilibrée de la quantité Kanban k_i entre la commande et les différents stocks de chaque boucle du système), différents résultats de simulation peuvent être représentés (cf. figures de IV.3 à IV.12). Ces figures montrent l'évolution reproduite en fonction du temps de l'état du réseau logistique par le modèle RdPCV global en termes de la quantité instantanée de produits réceptionnés, en cours de transformation ou stockés, de quantité de demande, de débit, de pénuries,…à travers les différents acteurs du réseau et les vecteurs de transport assurant leur interconnexion. Vu la taille du modèle, nous ne pouvons présenter l'ensemble des résultats obtenus. Nous sélectionnons seulement les plus représentatifs.

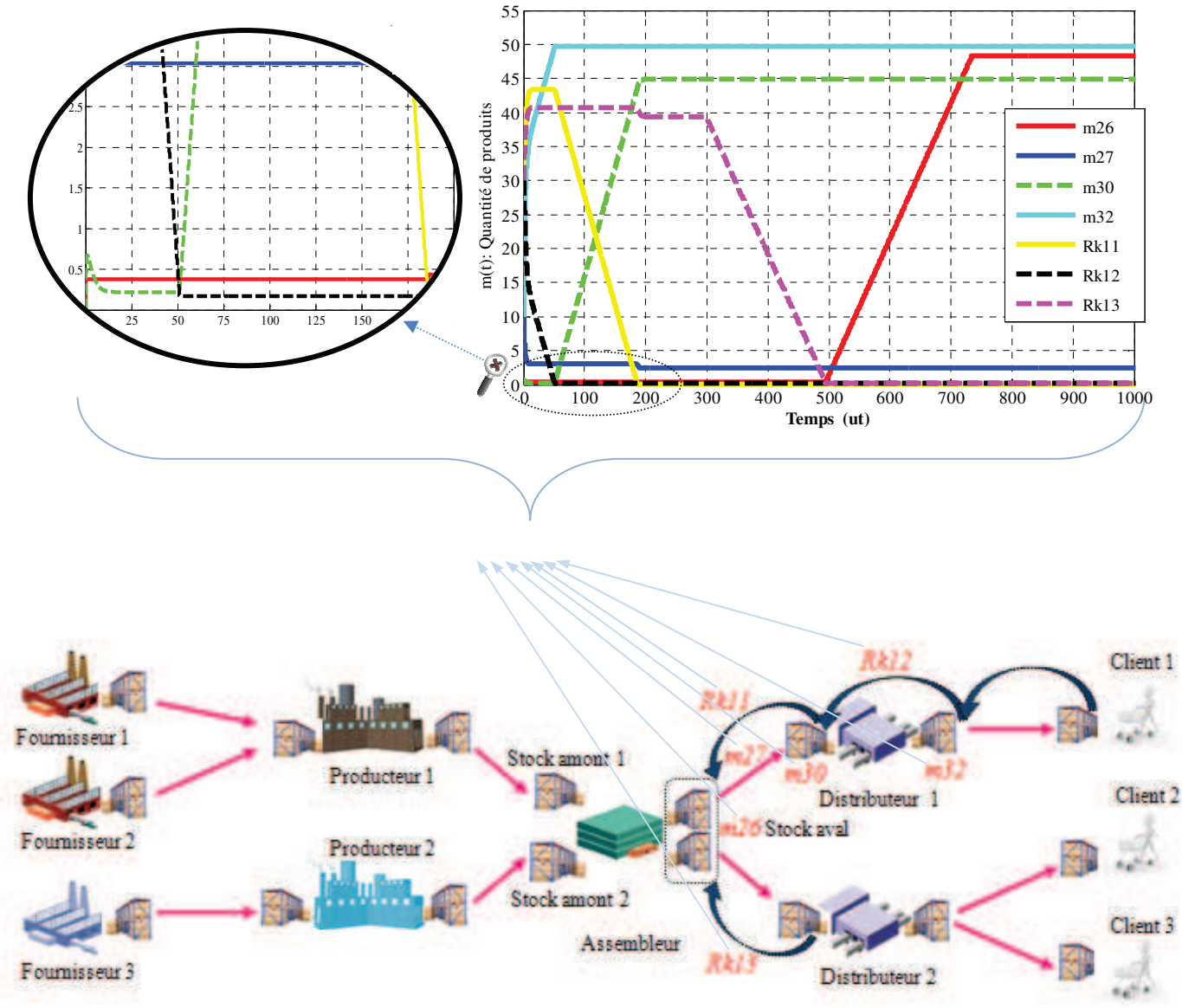


Figure IV.3 *Evolution en fonction du temps de : l'engagement Rk12 du distributeur 1 et sa demande de réapprovisionnement Rk11 ainsi que les niveaux de ses stocks amont et aval m30 et m32 ; le niveau du stock aval m26 de l'assembleur et la quantité m27de produits finis destinée vers le distributeur 1; la demande de réapprovisionnement Rk13du distributeur 2.*

Au regard des courbes présentées à la figure IV. 3, à partir de l'état initial du réseau logistique, où la demande d'engagement *Rk12* à préparer les produits finis[1] du distributeur 1 est relativement importante (*Rk12 =30* produits finis avec une taille de la boucle Kanban de *50*), la demande de réapprovisionnement Rk11 de ce distributeur[2] augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale (vers *43* produits, cf. figure IV.4-a-) imposée par la limite de la taille de

[1] Pour remplacer la quantité de produits enlevée de sa zone de stockage en répondant à la demande du revendeur 1.

[2] Pour remplacer la quantité de produits de sa zone de réception qui vient d'être mise en préparation suite à sa demande d'engagement *Rk12*.

la boucle Kanban. Le fait que le stock de réception *m30* du distributeur 1 atteigne sa valeur minimale (*0.22*) à partir de son état initial *0*, impacte la demande d'engagement *Rk12* et le niveau de la zone de stockage *m32* de ce distributeur. Par conséquent, la demande d'engagement *Rk12* va être satisfaite moins vite (avec le débit *x32*) jusqu'à atteindre sa valeur d'équilibre[3] à l'instant *t=50 u.t* (cf. figure IV.6).

De même, la zone de stockage *m32* va se remplir, au même rythme (débit) que la demande d'engagement, jusqu'à atteindre la valeur maximale déterminée par la taille de la boucle Kanban (vers *49 produits*) à l'instant *t=50 u.t* pour se stabiliser à ce niveau d'équilibre (débit de remplissage du stock égal à celui de sa livraison : *x32=x35*, cf. figure IV.6). A ce même instant, la demande de réapprovisionnement *Rk11* commence à diminuer, jusqu'à atteindre sa valeur d'équilibre (*0.12*) à l'instant *t=186.5 u.t* (cf. figure IV.4-a-). La diminution de la demande d'engagement *Rk12* ainsi que la satisfaction partielle de l'assembleur à la demande de réapprovisionnement *Rk11* du distributeur 1, entraînent l'augmentation du stock amont *m30* du distributeur 1 jusqu'à atteindre la valeur maximale (*44*). Le fait que la demande de réapprovisionnement *Rk11* atteigne sa valeur d'équilibre, provoque :

- une augmentation du niveau du stock *m26* de *0.38* à *0.43* (cf. figure IV.4-c-),

- une diminution de la quantité de produits finis *m27* destinée au distributeur 1 de la valeur *3* à celle de *2.4*,

- et une diminution de la demande de réapprovisionnement *Rk13* de *40.7* à *39.4* dû au fait que l'assembleur répond d'avantage à la demande du distributeur 2 (cf. figure IV.4-b-).

[3] La valeur d'équilibre correspond à un régime d'écoulement stationnaire où la quantité de produits, dans l'endroit considéré du réseau logistique, est constante et ne varie plus au cours du temps, c.à.d. dont le flux associé est nul. Elle correspond uniquement aux débits de demandes des clients finaux et aux caractéristiques du réseau dans l'endroit considéré.

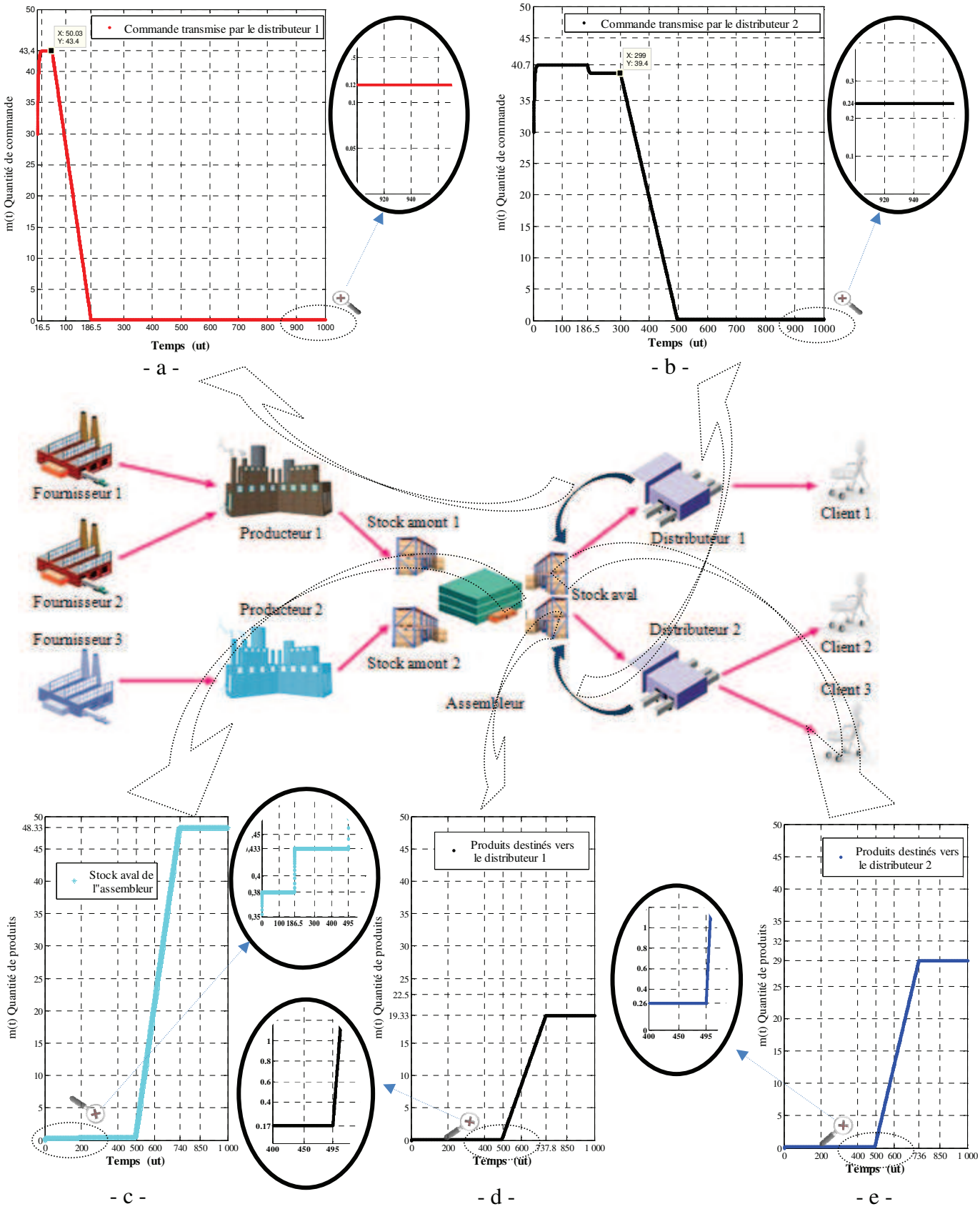


Figure IV.4 *Evolution en fonction du temps des demandes de distributeurs et de la quantité de produits dans le stock aval de l'assembleur et sa répartition entre les deux distributeurs en aval.*

De même, la mise en préparation d'une quantité de produits finis par le distributeur 2 suite à une demande d'engagement[4] *Rk14* de *10 produits* à l'état initial (cf. figure IV.5) conduit d'un côté, à l'augmentation de la demande de réapprovisionnement *Rk13* de ce distributeur de son état initial de *30 produits* jusqu'à atteindre une valeur maximale (vers *40 produits*) (cf. figure IV.4-b-) et d'un autre côté, à l'augmentation du niveau de la zone de stockage *m41* de ce distributeur de son état initial de *20 produits* jusqu'à atteindre la valeur de *49.2* à l'instant *t=10 u.t* (cf. figure IV.5). A ce même instant, ce niveau de la zone de stockage *m41* recommence à diminuer entrainant, par conséquent, une augmentation du niveau de l'accumulation de la demande d'engagement *Rk14*. Le fait que l'assembleur commence à répondre d'avantage à la demande du distributeur 2 à partir de l'instant *t=186.5 u.t*, entraîne une augmentation de la quantité de produits finis *m37*, destinée au distributeur 2 de la valeur *4.5* à celle de *5.2* (cf. figure IV.5). Ce changement conduit à une augmentation de la capacité d'écoulement des produits au niveau du distributeur 2. A son tour, cette augmentation provoque la diminution du niveau de l'accumulation de la demande d'engagement *Rk14*, jusqu'à atteindre le niveau d'équilibre. Par voie de conséquence, la zone de stockage m41 subit l'effet inverse. Ce changement se propage, pour atteindre la demande de réapprovisionnement *Rk13* et le stock de réception *m39*, dès que la demande d'engagement *Rk14* et la zone de stockage *m41* se stabilisent. Alors *Rk13* et *m39* subissent respectivement les mêmes effets que *Rk14* et *m41* (cf. figure IV.5).

[4] Afin de remplacer la quantité de produits enlevée de sa zone de stockage en répondant aux demandes des deux revendeurs 1 et 2.

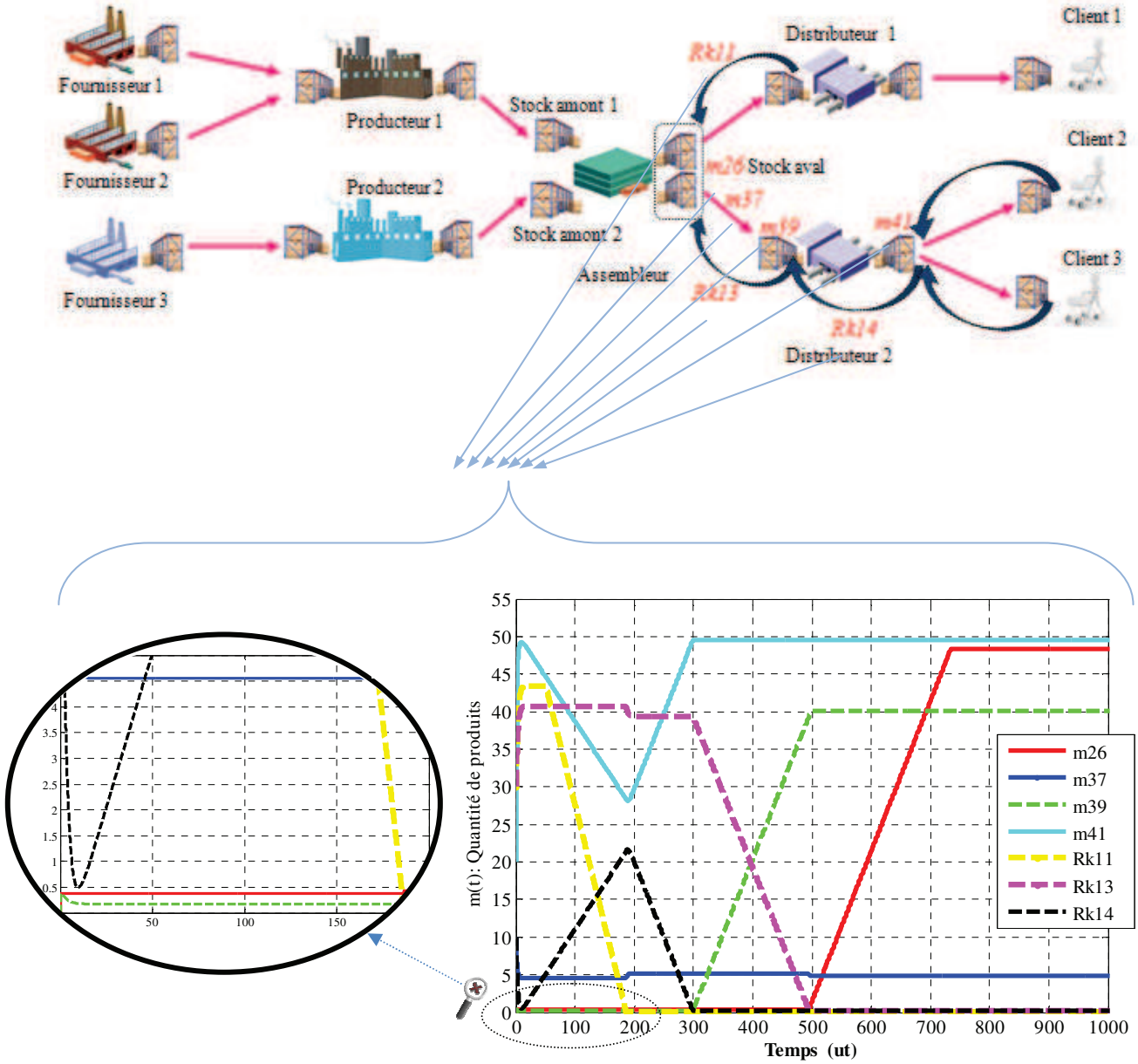


Figure IV.5 *Evolution en fonction du temps de : l'engagement Rk14 du distributeur 2 et sa demande de réapprovisionnement Rk13 ainsi que les niveaux de ses stocks amont et aval m39 et m41 ; le niveau du stock aval m26 de l'assembleur et la quantité m37de produits finis destinée au distributeur 2.*

La figure IV.7 montre qu'à l'état initial, suite à la réponse de l'assembleur aux demandes des deux distributeurs, celui-ci engage une demande d'assemblage pour remplacer la quantité de produits enlevée de son stock aval. Ce qui justifie l'augmentation du niveau de la demande d'engagement *Rk10* jusqu'à atteindre le niveau *35.38* qui correspond à la capacité d'écoulement[5] des produits au niveau de l'assembleur (cf. figure IV.8-a-). Quant au processus

[5] Dû aux caractéristiques des différents processus de l'assembleur (débits maximaux et capacité maximale d'assemblage fixée ici à *15 produits*).

d'assemblage, à l'état initial, il est saturé, ce qui entraîne une augmentation au niveau des deux stocks amont *m23* et *m24* (cf. figure IV.8-b-c-d-). Ces deux derniers continuent à se remplir à leur débit maximal (*x24=x21=0.5véhicules/u.t =5produits/u.t*, cf. figure IV.6) jusqu'à ce qu'ils se stabilisent à leur niveau maximal (à *34*) qui correspond à la capacité d'écoulement de l'assembleur d'un côté (*x26=3.8 p/u.t*), et à celles des deux transports en amont de l'assembleur (*x24 = x25= 0.38 v/p*) d'un autre côté (cf. figure IV.6). Le fait que la demande d'engagement d'assemblage *Rk10* atteigne un niveau correspondant à la capacité d'écoulement de l'assembleur (assemblage par son débit maximal *x27=3.8 p/u.t*), conduit à une stabilisation du niveau d'en-cours d'assemblage à *14.23* (cf. figure IV.8-d-).

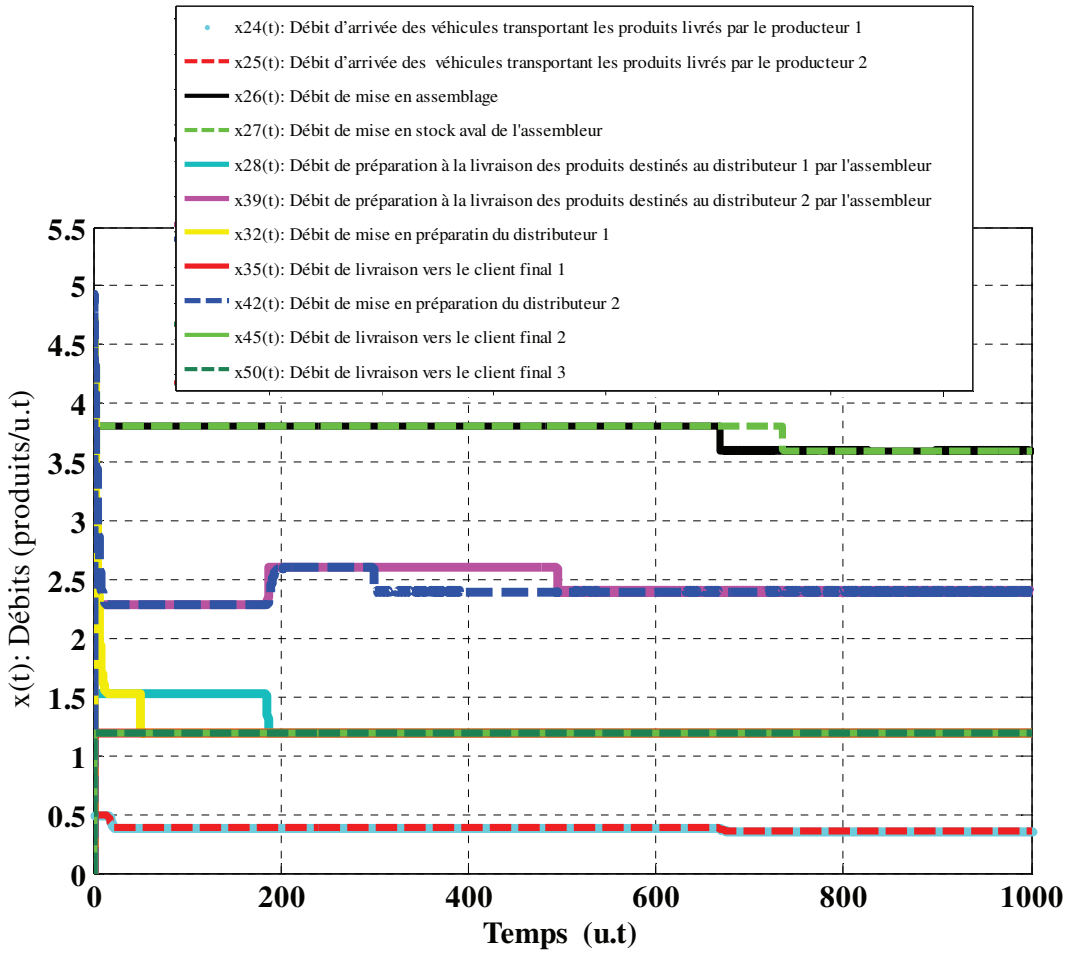


Figure IV.6 *Évolution instantanée moyenne des débits d'écoulement des flux de produits entre les différents acteurs et à travers leur processus de transformation.*

Le fait que la demande de réapprovisionnement *Rk13* du distributeur 2 atteigne sa valeur d'équilibre (après celle du distributeur 1), provoque une augmentation du niveau du stock aval *m26* de l'assembleur et par voie de conséquence une diminution du niveau de la demande d'engagement d'assemblage jusqu'à atteindre sa valeur d'équilibre à *0.72* (cf. figure IV.8-a-), en provoquant par conséquent une diminution du niveau d'en-cours d'assemblage,

jusqu'à atteindre sa valeur d'équilibre *0.94* à l'instant *t=734 u.t* (cf. figure IV.8 -d-). Par conséquent, à ce même instant, le niveau du stock aval *m26* de l'assembleur atteint sa valeur d'équilibre à *48.3* (cf. figure IV.4 -c-).

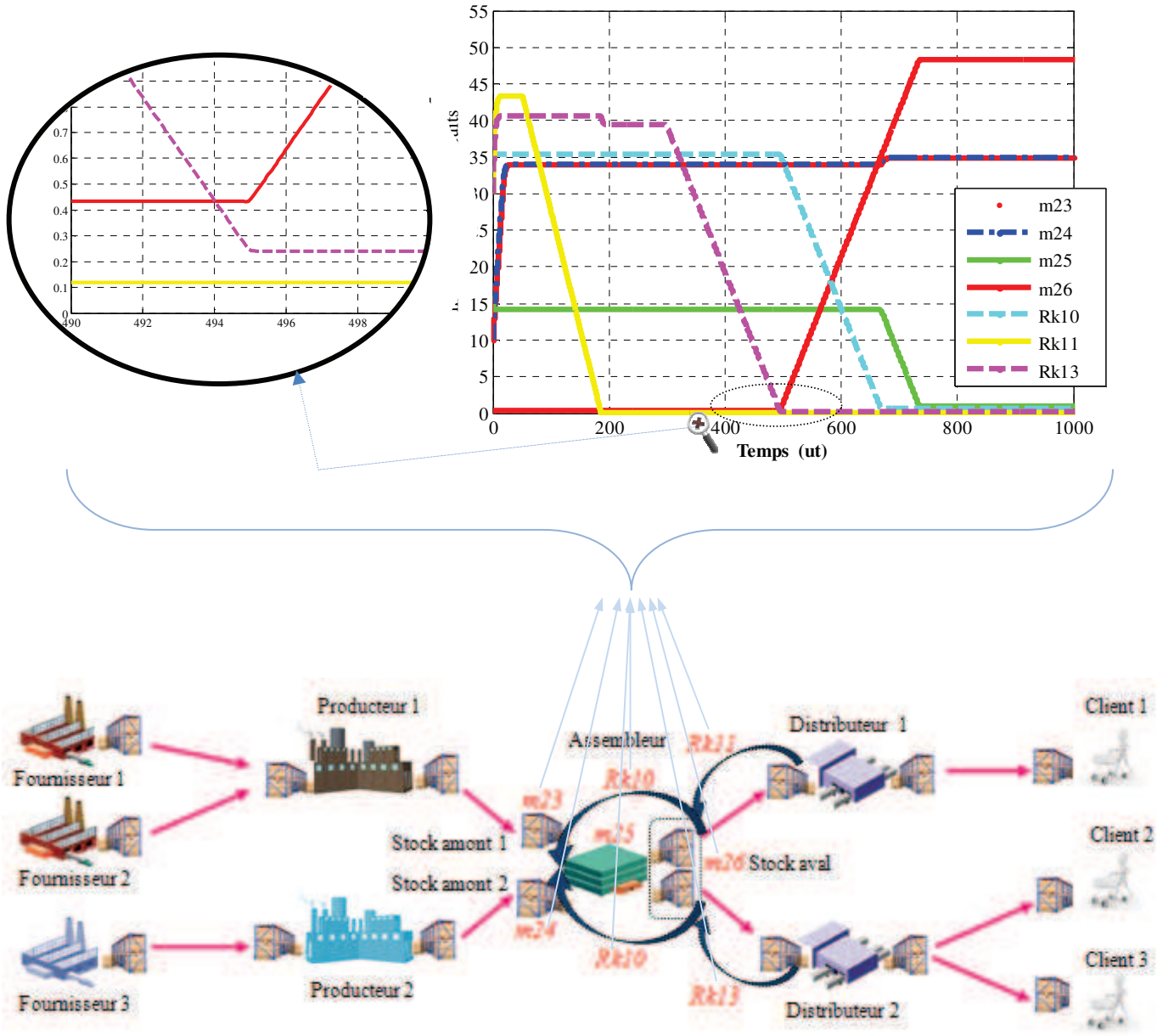


Figure IV.7 *Evolution en fonction du temps de la demande d'assemblage et des quantités de produits dans les stocks amont et aval et en cours d'assemblage.*

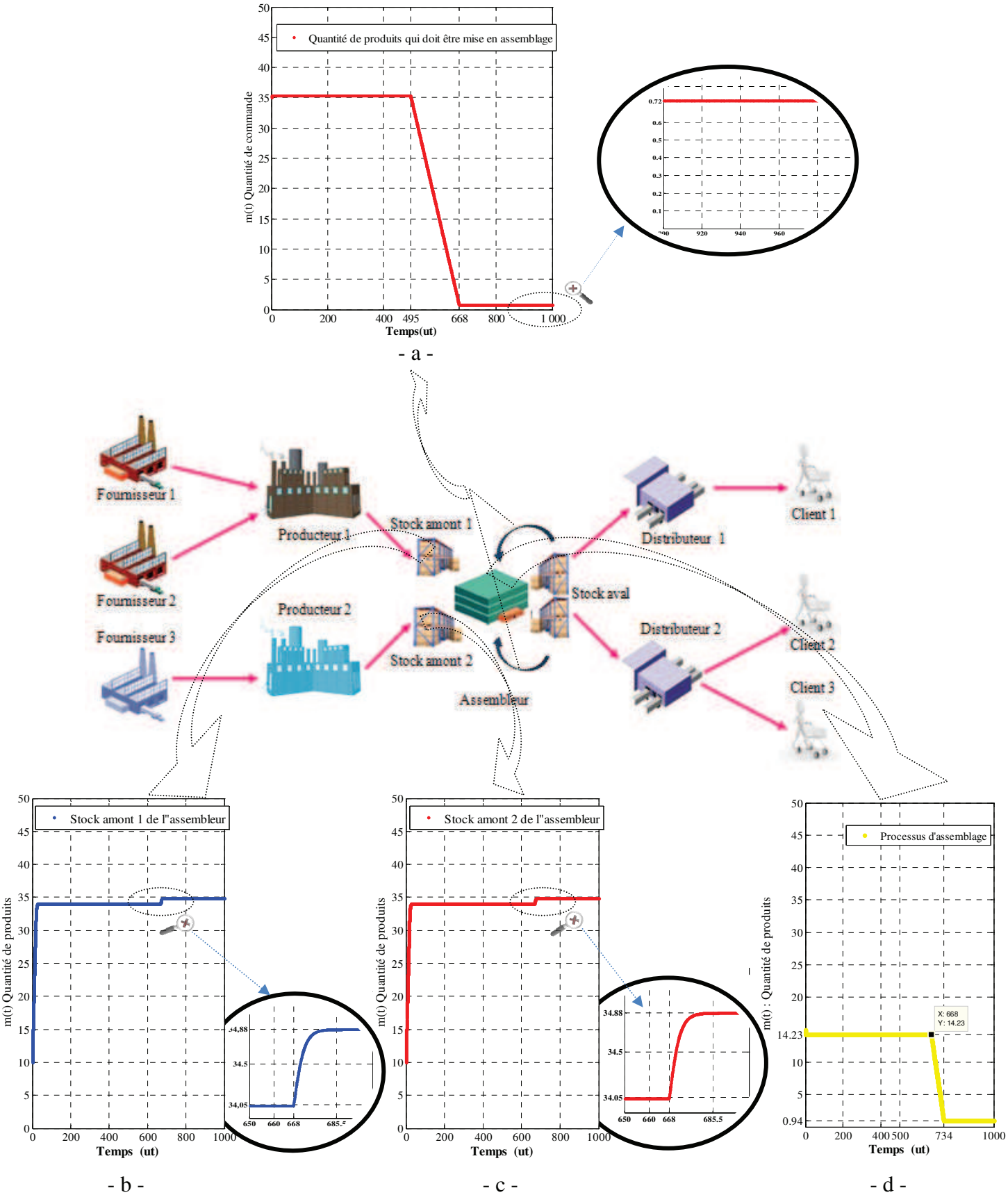


Figure IV.8 *Courbes séparées avec zoom de l'évolution en fonction du temps de la demande d'assemblage et des quantités de produits dans les stocks amont et aval et en cours d'assemblage.*

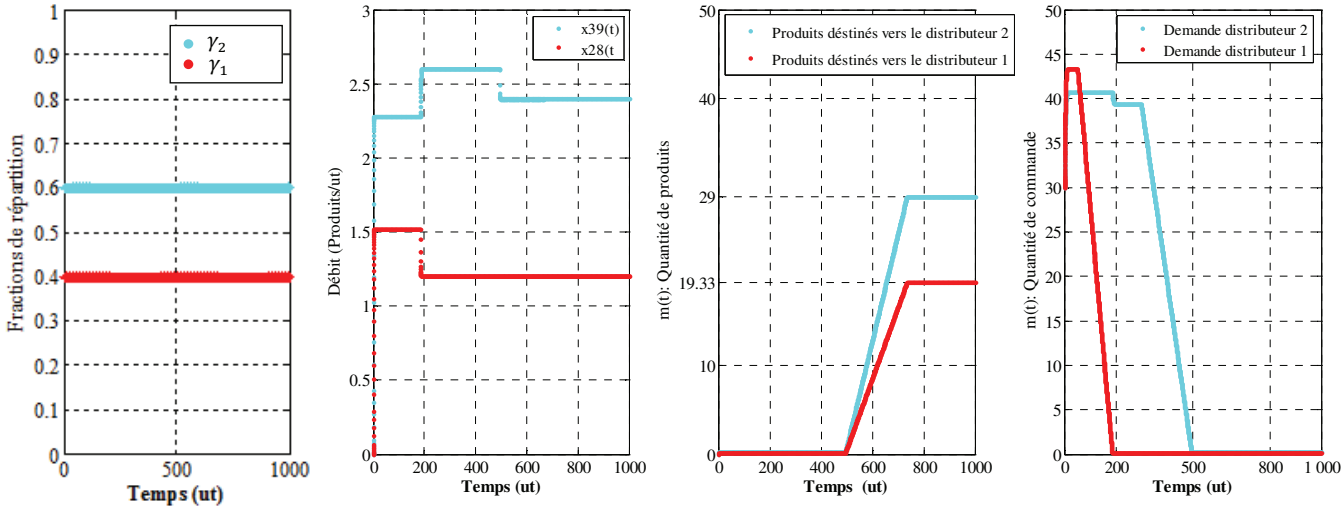


Figure IV.9 *Evolutions de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de respecter au mieux une répartition constante de flux entre les distributeurs* $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\,, 0.6)$.

Notons ici que la capacité de livraison moyenne de l'assembleur vers le distributeur 1 est inférieure à celle de l'assembleur vers le distributeur 2, car le distributeur 1 reçoit 40% ($\gamma_1 = 0.4$) du flux transitant par le stock aval de l'assembleur (cf. figure IV.9). Ainsi, pour un stock aval de l'assembleur possédant, à un instant donné, environ *49 produits* (à *t=740 u.t* par exemple), *20 produits* sont destinés au distributeur 1 et *29 produits* sont destinés au distributeur 2. Par conséquent le débit de livraison de l'assembleur vers le distributeur 2 est plus important, comparé à celui de l'assembleur vers le distributeur 1 (cf. figure IV.9). En effet, l'objectif recherché par l'assembleur ici, est de respecter au mieux les répartitions de la quantité de produits disponibles dans son stock aval entre les deux distributeurs qui sont initialement prévues « ratios »[6] comme suit : $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\,, 0.6)$. Ce qui est le cas de notre résultat ici.

Voyons à présent, le cas où l'objectif recherché par l'assembleur est d'ajuster les répartitions de la quantité instantanée de produits disponibles dans son stock aval, entre les deux distributeurs, de manière à limiter au maximum l'attente des commandes de ces deux distributeurs (cf. figure IV.10). Nous constatons dans ce cas que l'assembleur répond d'avantage à la demande instantanée du distributeur 2, dû au fait que la demande de ce dernier est plus importante comparée à celle du distributeur 1. Toutefois, il s'agit ici d'une

[6] Ces rations constantes peuvent correspondre par exemple à un équilibrage initial du personnel (réparti en fonction de chaque flux à livrer par l'assembleur vers les distributeurs).

réadaptation continue au cours du temps, des fractions de répartition entre les deux distributeurs contrairement au premier cas où il s'agit d'une répartition constante au cours du temps.

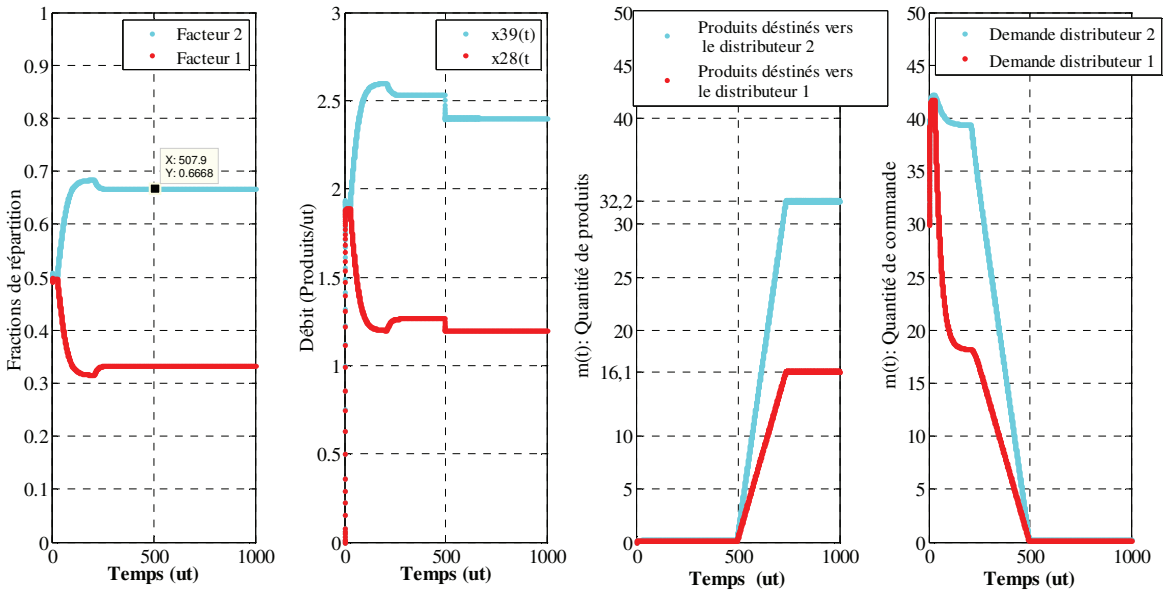


Figure IV.10 *Evolutions de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de limiter au maximum l'attente des commandes (réadaptation continue au cours du temps des fractions de répartition entre les deux distributeurs).*

Etudions à présent l'impact de l'absence de la demande du distributeur 1 (pour diverses raisons) à partir de l'instant *t=250 u.t* sur les deux types de répartition entre les deux distributeurs (cf. figure IV.11 et IV.12).

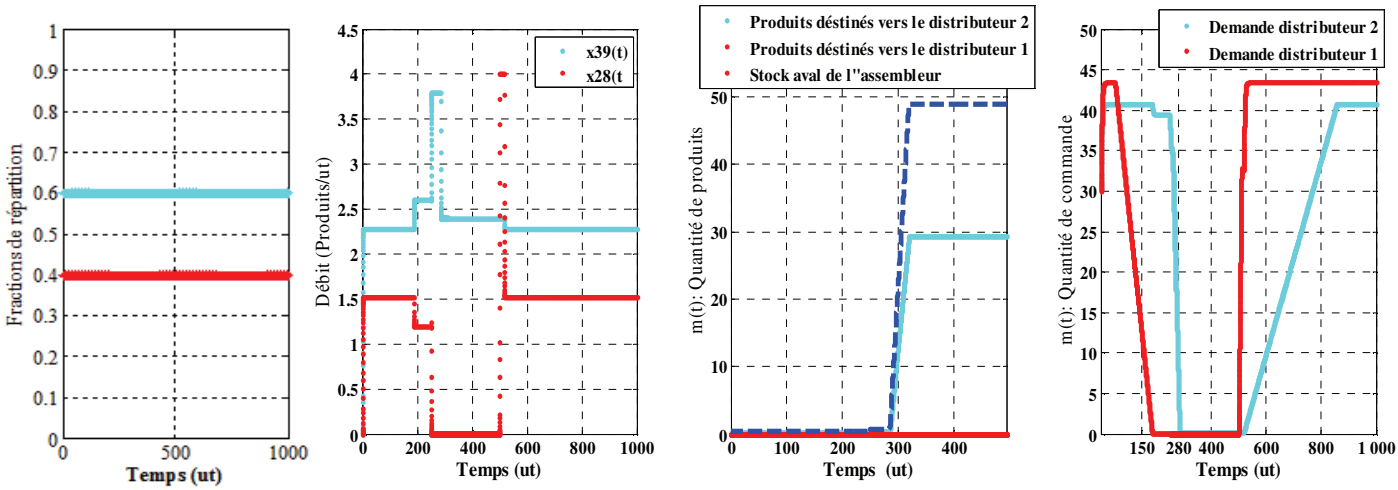


Figure IV.11 *Impact de l'absence de la demande du distributeur 1 à l'instant t=250 u.t sur l'évolution de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de respecter au mieux une répartition constante de flux entre les distributeurs* $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.4\,, 0.6)$.

Nous constatons pour le cas de la répartition prévue initialement, qu'il n'y a aucune réadaptation de la politique de livraison et que le distributeur 2 reçoit toujours 60% de la quantité instantanée de produits disponibles dans le stock aval de l'assembleur, même en l'absence de la demande du distributeur 1 (cf. figure IV.11). Ainsi, 40% de la quantité instantanée de produits disponibles dans le stock aval de l'assembleur restent sans mobilisation, malgré la constatation d'une accumulation de la demande du distributeur 2.

Pour le deuxième cas (cf. figure IV.12) où la répartition est variable, l'absence de la demande du distributeur 1 conduit à une réadaptation des fractions de répartition pour satisfaire au maximum la demande du distributeur 2. Ainsi, dans ce cas le distributeur 2 reçoit 100% de la quantité instantanée de produits disponibles dans le stock aval de l'assembleur.

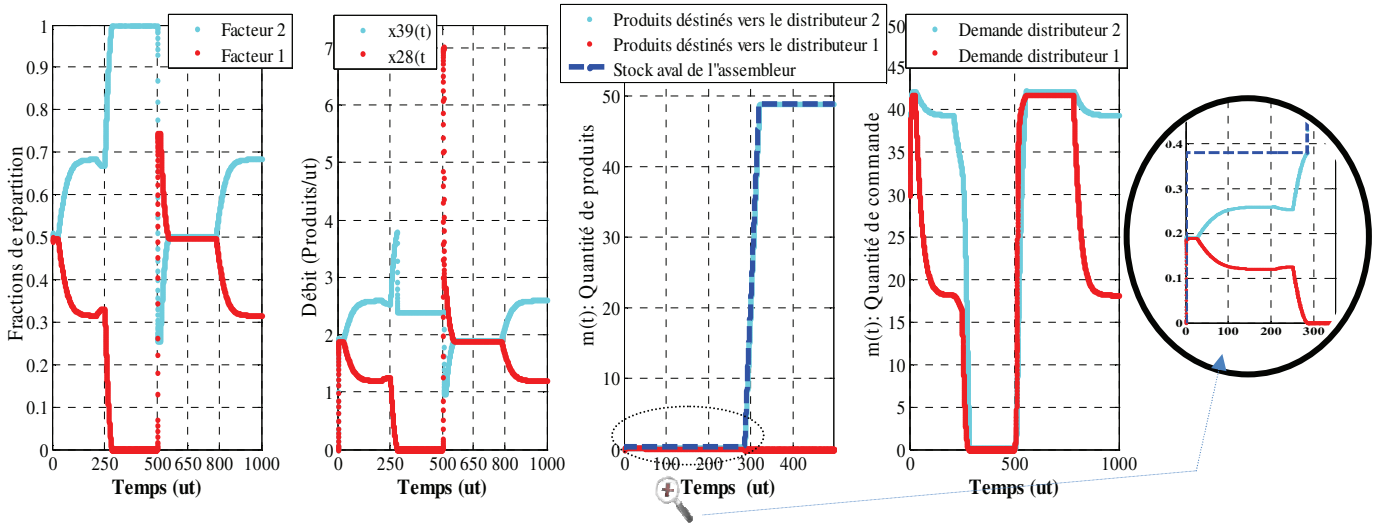


Figure IV.12 *Impact de l'absence de la demande du distributeur 1 à l'instant t=250 u.t sur l'évolution de l'écoulement des flux de produits et de commandes entre l'assembleur et les distributeurs dans le cas où l'objectif de l'assembleur est de limiter au maximum l'attente des commandes.*

L'arrivée à nouveau de la demande du distributeur 1 à partir de l'instant t=500 u.t (après 250 u.t de son absence), permet à l'assembleur de trouver sont comportement habituel selon son objectif recherché.

Il est clair à travers les résultats de simulation obtenus que le modèle RdPCV global reproduise soigneusement le comportement dynamique moyen de l'écoulement des différents flux (physique et informationnel) au sein du réseau logistique. En effet, à partir du besoin exprimé par les trois revendeurs, des flux d'information sont générés et propagés de proche en proche en remontant des demandes tout au long du réseau logistique, jusqu'aux acteurs situés le plus en amont qui sont les fournisseurs de matières premières. En réponse, des actions adaptées à ces demandes sont déclenchées et un flux physique est mobilisé à travers

les acteurs et les connexions de transport en livrant des produits depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'aux revendeurs. A cet égard, d'un point de vue informationnel, lorsqu'une demande se présente à un acteur du réseau logistique, ce dernier :

- *engage un ordre de livraison afin d'expédier les produits demandés (selon la disponibilité des produits et du transport servant l'acteur considéré) ;*
- *ensuite, lance une demande d'engagement de transformation pour remplacer la quantité de produits enlevée du stock aval ;*
- *enfin, passe une demande de réapprovisionnement pour remplacer la quantité de produits du stock amont qui vient d'être mise en transformation.*

Et d'un point de vue physique, lorsque cet acteur reçoit des produits, ils sont entreposés dans son stock amont, s'il n'y a pas de demande d'engagement de transformation. Lorsqu'une demande d'engagement de transformation est lancée, les produits sont traités pendant une durée donnée puis ils sont entreposés dans son stock aval en attendant la présence d'une demande à cet acteur.

5. EVALUATION DE PERFORMANCE DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Nous nous intéressons dans cette section à l'évaluation de performance du réseau logistique (cf. figure IV) via le modèle RdPCV global, pour illustrer la manière dont ce modèle peut aider à analyser ce réseau logistique, et apporter des informations nécessaires afin d'aider à la prise d'une décision ou d'évaluer la qualité des décisions prises dans l'objectif d'explorer les améliorations possibles. La richesse dynamique du modèle RdPCV global de la CL développé et sa formalisation explicite de l'articulation entre les engagements ou les décisions à prendre (livraison, transformation et réapprovisionnement) et les différentes mesures disponibles sur l'état du système (niveaux des stocks, en-cours de transformation, …) ainsi que son environnement (état du transport, demandes), permet d'évaluer aisément d'importants indices de performances de la chaîne. Nous nous appuyons dans cette démarche, sur les indices de performances associés à notre modèle RdPCV global mentionnés auparavant (cf. section 3 dans ce chapitre) et nous nous inspirons des travaux effectués en ce sens tout en menant le même type d'étude [Cheyroux, 2003 ; Bruniaux, 2000 ; Zillus, 1999 ; Labadi, 2005]. Dans ce contexte, nous analysons les effets des différents paramètres du modèle RdPCV global de la chaîne : sensibilité de la CL étudiée aux conditions initiales, effets de la variation des demandes, effets de la variation du débit de transport et l'effet de la variation de la taille des boucles Kanbans.

5.1 Sensibilité du réseau logistique étudié aux conditions initiales

Afin de relever la sensibilité du réseau logistique étudié aux conditions initiales, nous proposons ici une analyse en suivant l'indicateur pénurie *pr(t)* représentant la quantité de produits manquants par rapport à la quantité demandée à un instant donné pour un acteur donné. Il est déduit à partir des variables explicitées par notre modèle RdPCV comme suit :

- Cas d'une demande externe

$$pr(t) = \begin{cases} m_i^{Dc}(t) - m_i^{Av}(t) & si\ \ m_i^{Dc}(t) > m_i^{Av}(t) \\ 0 & sinon \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

où $m_i^{Dc}(t)$ représente la demande en attente (non encore servie) transmise par des acteurs en aval de l'acteur considéré et $m_i^{Av}(t)$ représente la quantité instantanée de produits disponibles dans le stock aval de cet acteur considéré.

- Cas d'une demande interne

$$pr(t) = \begin{cases} m_i^{Rk}(t) - m_i^{Am}(t) & si\ \ m_i^{Rk}(t) > m_i^{Am}(t) \\ 0 & sinon \end{cases} \quad \text{(IV.2)}$$

où $m_i^{Rk}(t)$ représente la quantité instantanée de produits devant être mis en transformation par un acteur et $m_i^{Am}(t)$ représente la quantité instantanée de produits disponibles dans le stock amont de cet acteur.

Nous suivrons l'évolution au cours du temps de cet indicateur, à travers trois régimes d'état initial du réseau logistique:

- un ***régime surchargé,*** dont le stock disponible dans le réseau logistique à l'état initial est important par rapport au nombre de demandes en attente ;
- un ***régime équilibré,*** dont le stock disponible dans le réseau logistique et le nombre de demandes en attente à l'état initial sont équilibrés ;
- et un ***régime de rupture,*** dont le nombre de demandes en attente est important par rapport au stock disponible dans le réseau logistique à l'état initial.

Les figures IV.13, IV.14 et IV.15 montrent l'évolution au cours du temps de l'indicateur pénurie *pr(t) «* la quantité de produits manquants par rapport à la quantité demandée à un instant donné » dans le cas d'une demande externe et d'une demande interne pour chaque acteur du réseau logistique (cf. tableau IV.2).

Pénurie	L'endroit dans le réseau logistique
pr1(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du fournisseur 1 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le producteur 1 pour son approvisionnement.
Pr2(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du fournisseur 2 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le producteur 1 pour son approvisionnement.
Pr3(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock amont du producteur 1 par rapport à la quantité devant être mise en production par ce producteur.
Pr4(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du fournisseur 3 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le producteur 2 pour son approvisionnement.
Pr5(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock amont du producteur 2 par rapport à la quantité devant être mise en production par ce producteur.
Pr6(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du producteur 1 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par l'assembleur pour son approvisionnement des produits de premier type.
Pr7(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du producteur 2 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par l'assembleur pour son approvisionnement des produits du deuxième type.
Pr8(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock amont de l'assembleur, contenant le moins de produits, par rapport à la quantité devant être mise en assemblage par cet assembleur.
Pr9(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval de l'assembleur par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le distributeur 1 pour son approvisionnement.
Pr10(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock amont du distributeur 1 par rapport à la quantité devant être mise en préparation par ce distributeur.
pr11(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval de l'assembleur par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le distributeur 2 pour son approvisionnement.
pr12(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock amont du distributeur 2 par rapport à la quantité devant être mise en préparation par ce distributeur.
pr13(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du distributeur 1 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le revendeur 1 pour son approvisionnement.
pr14(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du distributeur 2 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le revendeur 3 pour son approvisionnement.
pr15(t)	représente la quantité de produits manquants dans le stock aval du distributeur 2 par rapport à la quantité demandée à un instant donné par le revendeur 2 pour son approvisionnement.

Tableau IV.2 *Définition de l'indicateur de la pénurie dans les différents endroits du réseau logistique.*

Prenons le cas de la pénurie *pr11(t)* (cf. figures de IV.13 à IV.15) des produits finis en stock aval *m26* de l'assembleur représentant la quantité manquante de ce produit fini par rapport à la quantité demandée *Rk13* par le distributeur 2. Cette pénurie est particulièrement

significative car elle apparaît quel que soit le régime considéré et elle se propage au cours du temps en aval pour atteindre le stock amont du distributeur 2 dans le cas du régime équilibré (voir *pr11(t) et pr12(t)* sur la figure IV. 14) et même pour atteindre le stock aval du distributeur 2 dans le cas du régime de rupture (voir *pr11(t), pr12(t), pr14(t) et pr15(t)* sur la figure IV. 13). Nous nous concentrons sur le régime équilibré afin d'identifier la cause de cette pénurie. La figure IV.7 montre que le stock aval *m26* des produits finis de l'assembleur se stabilise au minimum dès le départ. Le stock intermédiaire en aval *m37* ne suffit pas à éviter la rupture d'approvisionnement dont la demande *Rk13* du distributeur 2 est demeurée importante. La figure IV.7 montre que le niveau de la demande d'engagement d'assemblage *Rk10* n'est jamais résorbé, malgré le fonctionnement au débit maximal de l'assembleur. Ce dernier n'arrive visiblement pas à suivre la fréquence d'assemblage imposée par les distributeurs. La figure IV.6 confirme que l'assembleur se trouve dans une situation goulot dont il présente une insuffisance dans sa capacité d'assemblage de produits finis par rapport à la capacité de fonctionnement des autres acteurs environnants dans le réseau. Il ne peut pas fournir plus car il se situe déjà au maximum de ce qu'il peut assembler. Au regard de l'ensemble de ces résultats, la constatation principale est que l'assembleur constitue un goulot qui freine l'écoulement du flux dans le réseau.

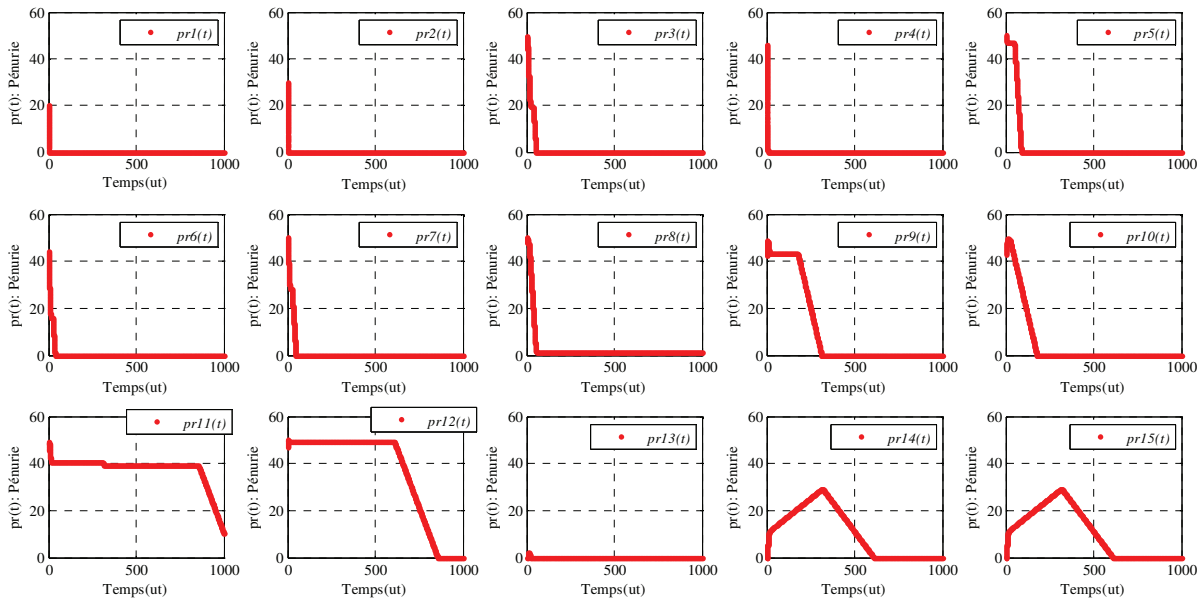


Figure IV.13 *Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime de rupture.*

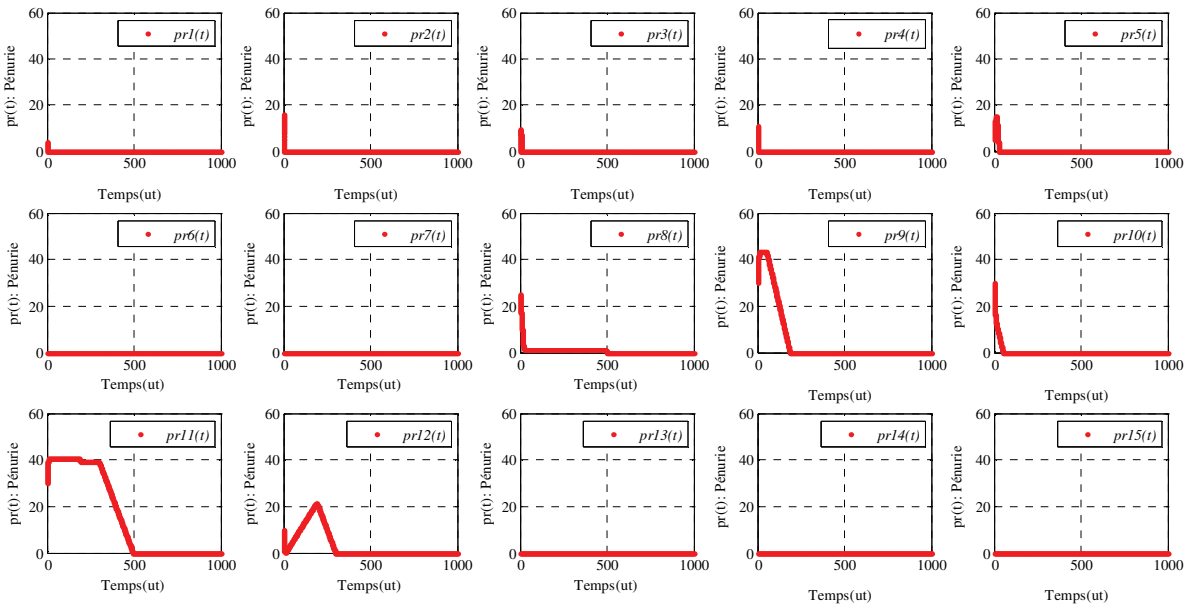


Figure IV.14 *Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime équilibré.*

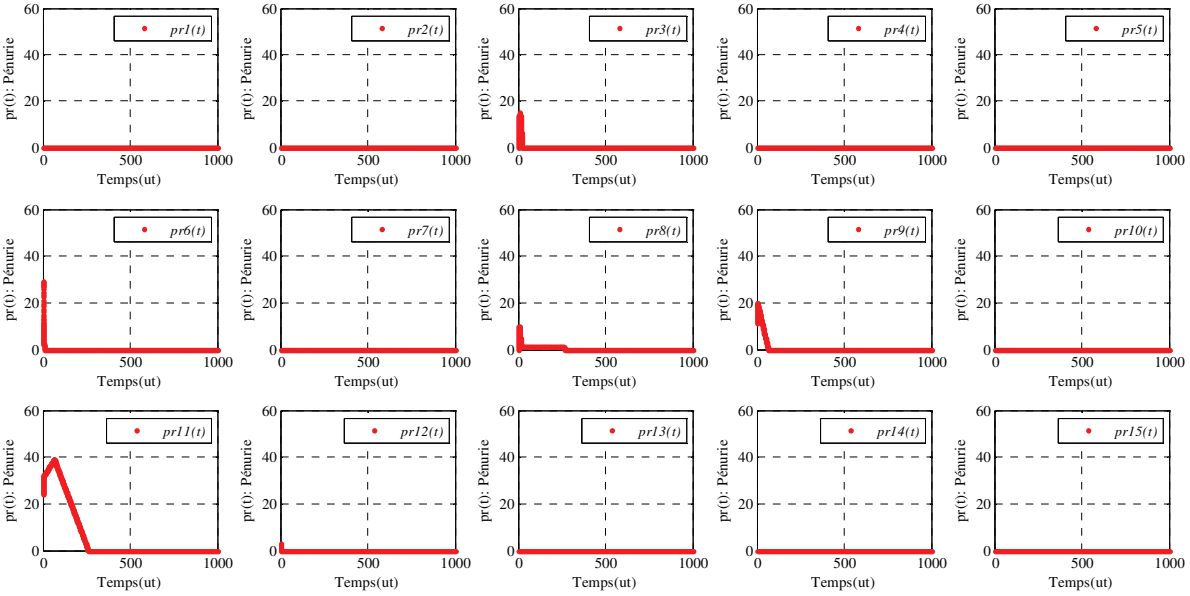
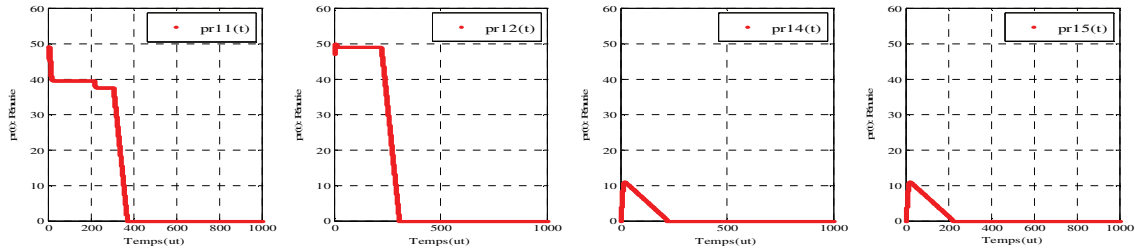
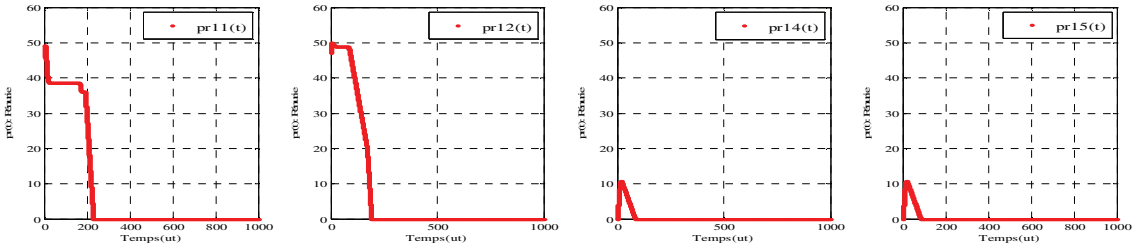


Figure IV.15 *Evolution au cours du temps de l'indicateur pénurie le long du réseau logistique dans le cas d'un régime surchargé.*

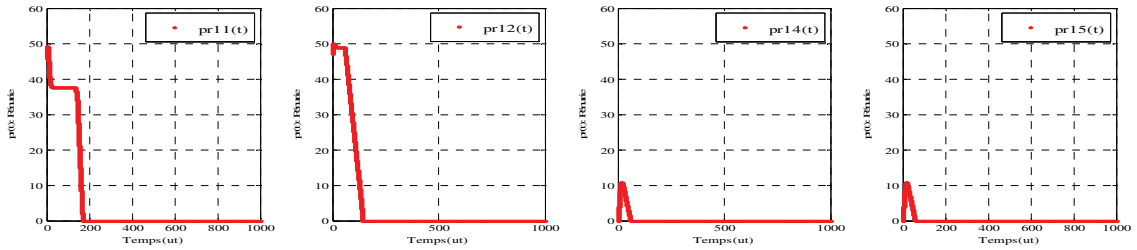
L'action possible afin d'éviter cette situation de goulot est d'augmenter la fréquence de traitement de cet assembleur. En effet, le fait d'amener plus de produits à cet assembleur ne lui servirait à rien. Les figures IV.16, 17, et 18 montrent qu'à partir d'une augmentation de 30% de la fréquence d'assemblage que la situation goulot commence à disparaitre. Notons qu'une telle solution n'est possible qu'à long terme et nécissite un investissement supplémentaire relatif aux ressources économiques et humaines [Bruniaux, 2000].



-a- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 10%.*

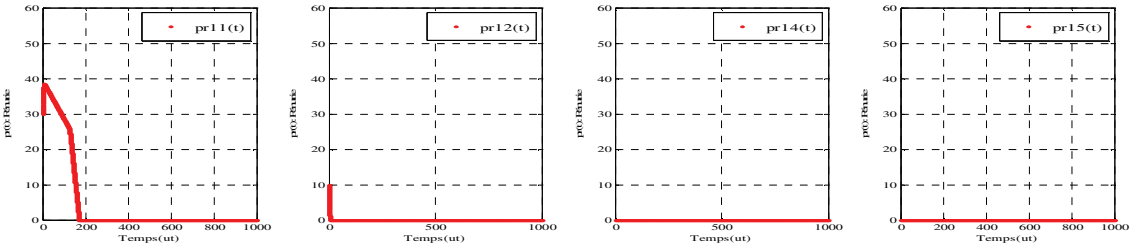


-b- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 20%.*

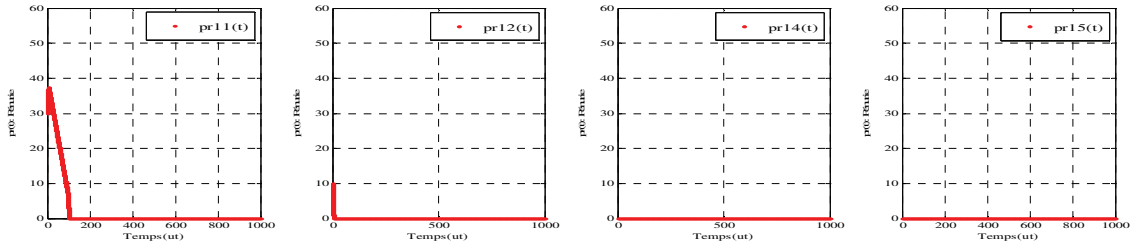


-c- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 30%.*

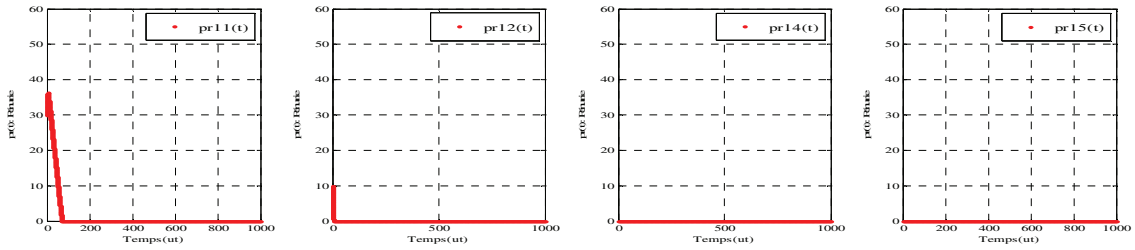
Figure IV.16 *Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime de rupture.*



-a- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 10%.*

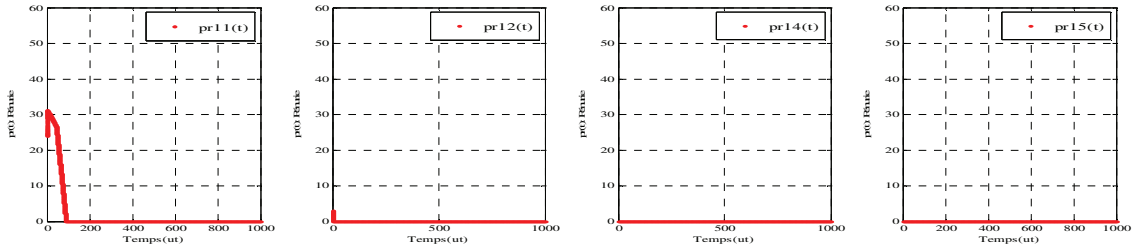


-b- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 20%.*

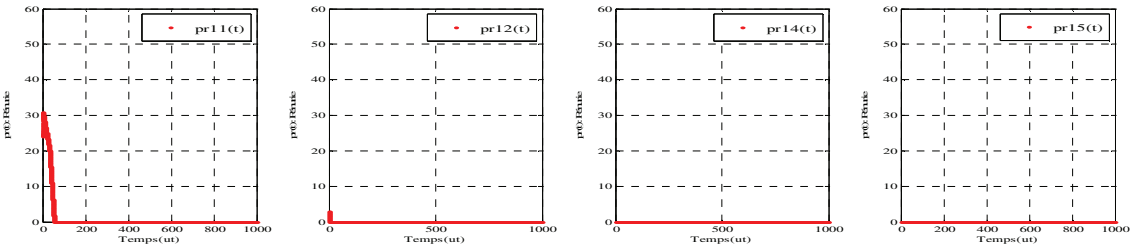


-c- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 30%.*

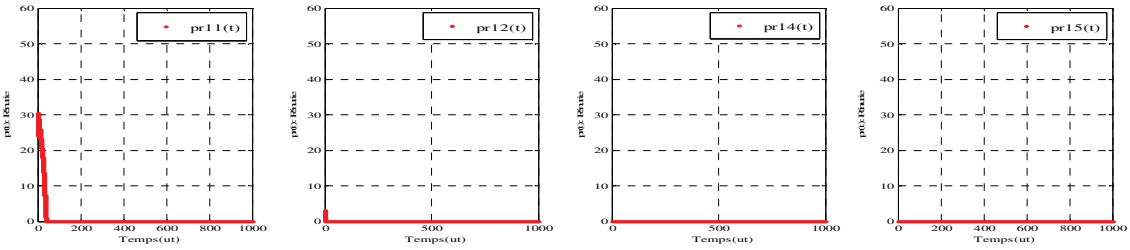
Figure IV.17 *Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime équilibré.*



-a- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 10%.*



-b- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 20%.*



-c- *Augmentation de la fréquence d'assemblage de 30%.*

Figure IV.18 *Effet d'une augmentation de la fréquence d'assemblage dans le cas d'un régime surchargé.*

Le suivi de cet indicateur pénurie au cours du temps et à travers les différents régimes d'état initial dans le modèle pourrait en fait repérer les moments où la capacité de répondre à la demande d'un acteur est limitée par un manque de produits ou par une saturation du processus de transformation (situation goulot).

5.2 Analyse des effets de la variation de la taille des boucles Kanbans

Nous étudions ici les effets d'une variation de la taille de la boucle Kanban en plusieurs endroits du réseau logistique. Nous faisons varier, tout d'abord, cette taille de 10 à 130 simultanément dans les boucles de demande d'engagement de transformation et de demande de réapprovisionnement de tous les acteurs dans le réseau. Puis nous faisons varier cette taille uniquement au niveau des fournisseurs et nous la fixons par 50 dans toutes les autres boucles dans le réseau. Enfin, nous faisons le même test qu'avant, sauf que cette fois-ci nous faisons varier cette taille uniquement au niveau des distributeurs. Nous observons, dans un premier temps, les effets produits sur l'indicateur taux de service. Cet indicateur est déduit à partir des variables du modèle RdPCV sous forme d'une moyenne de la demande satisfaite par rapport à la demande totale expédiée pendant une période donnée.

Au regard des courbes présentées aux figures IV.19, IV.20 et IV.21, nous nous rendons compte de l'impact de ces effets.

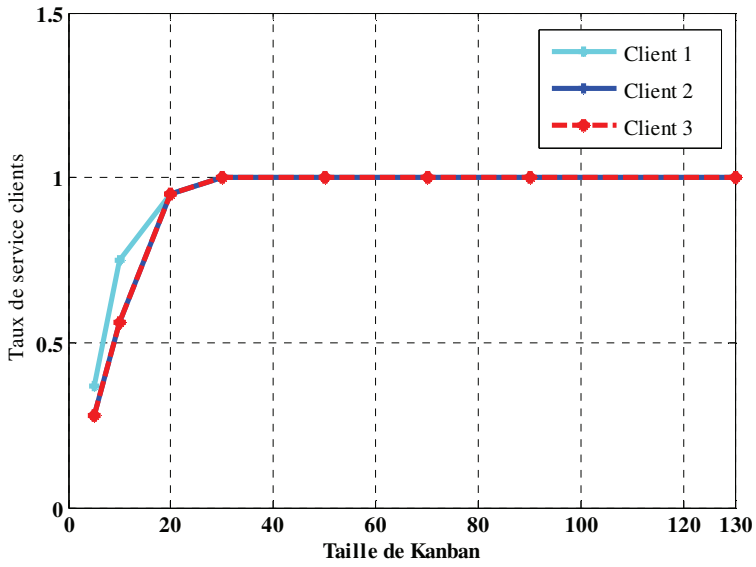


Figure IV.19 *Taux de service clients en fonction de la taille Kanban dans toutes les boucles du réseau logistique.*

A la figure IV.19, il apparaît qu'une attribution de moins de *20 Kanbans* par boucle, rend le réseau incapable de répondre aux demandes de ces clients. Cependant dès la valeur de *30 Kanbans*, le réseau est de nouveau opérationnel. Nous faisons maintenant varier la taille de Kanban uniquement dans un seul endroit du réseau, tout en conservant la taille de *50* dans les autres boucles.

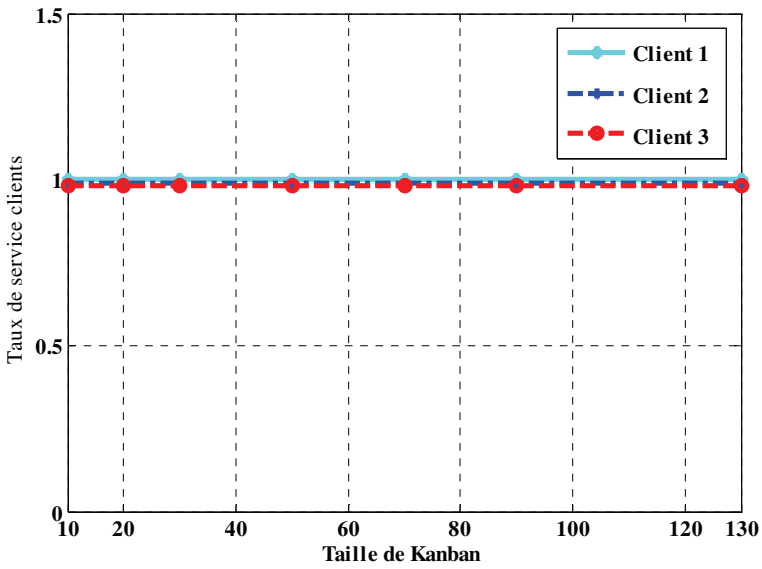


Figure IV.20 *Taux de service clients en fonction de la taille Kanban au niveau des fournisseurs.*

Nous constatons à travers la figure IV.20 qu'une variation de la taille Kanban au niveau des fournisseurs 1, 2 et 3, qui sont les acteurs les plus loin des clients dans le réseau logistique, ne parvient à aucun effet sur ces clients, contrairement à une variation au niveau des acteurs les plus près d'eux comme les distributeurs, qui affecte fortement leur taux de service (cf. figure IV.21).

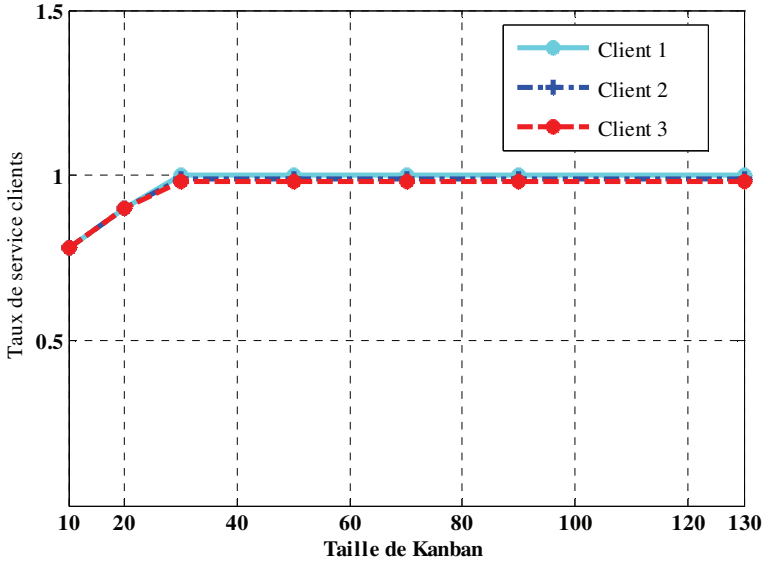


Figure IV.21 *Taux de service clients en fonction de la taille Kanban au niveau des distributeurs.*

Intéressons-nous maintenant aux impacts de ces variations de la taille Kanban dans certains endroits du réseau sur les niveaux des stocks. Ainsi pour une variation qui se fait au niveau des acteurs fournisseurs, l'effet est très direct sur les niveaux des stocks aval de ces fournisseurs (cf. figure IV.22). La relation est proportionnelle et les niveaux des stocks

suivent exactement la variation. Toutefois, lorsqu'il s'agit des stocks des producteurs 1 et 2 (cf. figure IV.23), qui sont les acteurs aval les plus proches des fournisseurs, l'effet devient moins fort que celui au niveau des stocks des fournisseurs eux-mêmes et il continue à décroitre chaque fois qu'on progresse en aval jusqu'aux clients finaux. Au regard de ces résultats, l'indication principale est que la taille de la boucle Kanban joue un rôle important au niveau local où elle intervient pour limiter les stocks.

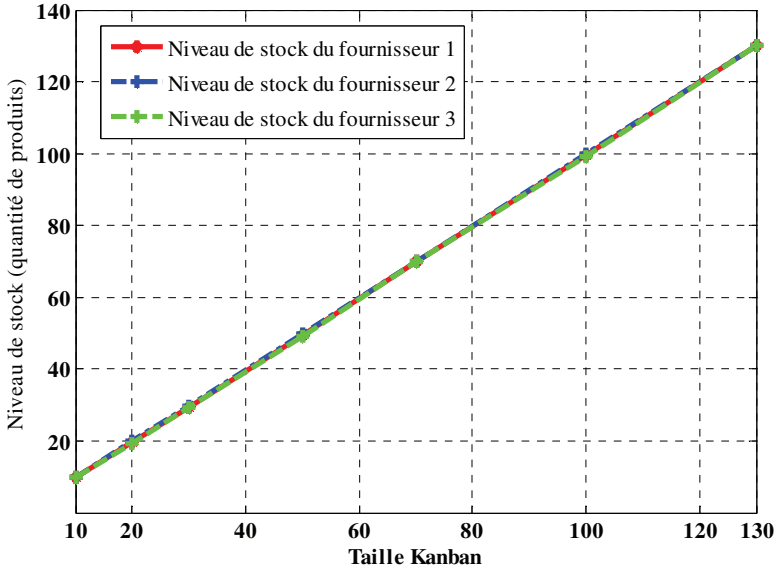


Figure IV.22 *Niveaux de stocks des fournisseurs en fonction de leur taille Kanban.*

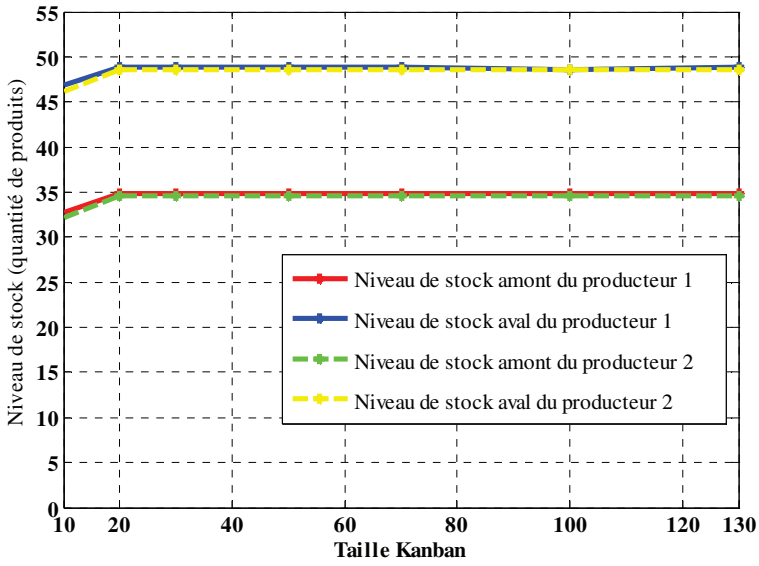


Figure IV.23 *Niveaux de stocks des producteurs en fonction de la taille Kanban au niveau des fournisseurs.*

5.3 Analyse des effets de la variation de la vitesse de transport

Étudions à présent, l'effet de la variation de la vitesse de transport sur les niveaux des stocks, les taux de service et le coût global Cg. Ce dernier peut être s'exprimé de manière explicite en trois termes : le coût des stocks Cs, le coût de rupture de stock Crs et le coût de transports Ct. Le coût de stockage Cs est calculé en fonction des quantités de produits stockés, des quantités de produits en cours de transformation et des valeurs λ_1, λ_2 et λ_3 associées à ces produits (plus élevées en aval du réseau qu'en amont) au niveau de tout les acteurs du réseau logistique. Quant au coût de rupture de stock Crs, il est déterminé en fonction du délai de retard de livraison qui est le délai d'exécution des commandes des produits. Pour notre cas, il est détérminé en fonction des niveaux de service clients et des valeurs de pondération λ_{client}. Enfin, le coût de transport est calculé en fonction du coût du véhicule $\lambda_{transport}$ utilisé pour le transport et du temps mis par ce véhicule pour transporter un flot de produits entre deux acteurs. Ainsi, le coût global peut être défini comme suit [Cheyroux, 2003]:

$$Cg = Cs + Crs + Ct \tag{IV.3}$$

$$\begin{cases} Cs = \lambda_1 \sum_{matières\ premières} (niveau\ \ des\ \ stocks + encours\ \ de\ \ transforma\ \ tion) \\ \quad + \lambda_2 \sum_{produits\ \ semi-finis} (niveau\ \ des\ \ stocks + encours\ \ de\ \ transforma\ \ tion) \\ \quad + \lambda_3 \sum_{prduits\ \ finis} (niveau\ \ des\ \ stocks + encours\ \ de\ \ transforma\ \ tion) \\ Crs = \sum_{clients} \lambda_{client} (1 - taux\ \ de\ \ service) \\ Ct = \sum_{transports} \lambda_{transport} (temps\ \ de\ transport) \end{cases} \tag{IV.4}$$

Les différentes valeurs de pondération sont choisies de manière à obtenir un indicateur équilibré entre ces différents coûts :

$\lambda_3 = 2\lambda_2 = 4\lambda_3 = 4$, $\lambda_{client1} = \lambda_{client2} = \lambda_{client3} = 300$, $\lambda_{transport1} = \lambda_{transport2} = ... = \lambda_{transport10} = 0.25$.

Nous faisons varier la vitesse des transports uniquement entre les différents fournisseurs et producteurs en agissant sur la fréquence maximale de transport et nous fixons la fréquence maximale des autres vecteurs de transport dans le réseau logistique à *0.5 véhicules/u.t*.

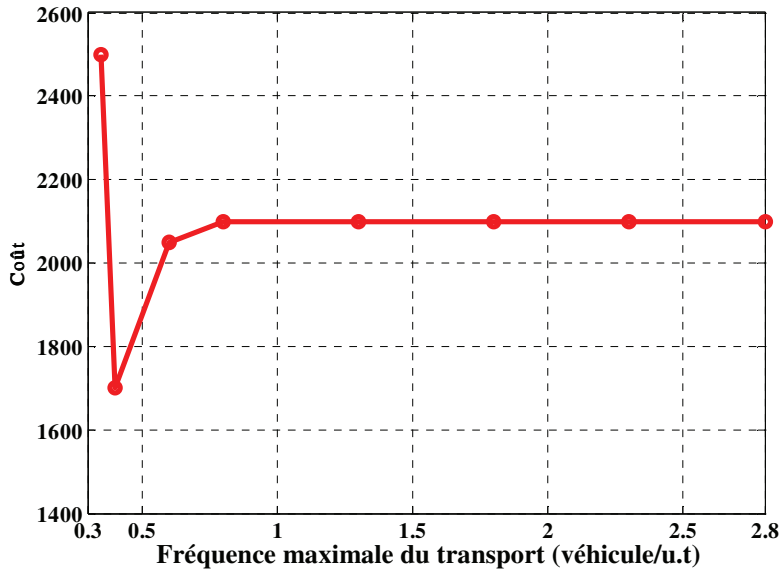


Figure IV.24 *Coût total en fonction du rythme des transports.*

Au regard des courbes présentées aux figures IV.24, IV.25, IV.26 et IV.27, nous constatons que lorsque les transports sont rapides, le coût est constant, dû à la manière de son calcul, où tous les stocks sont à leur niveau maximum tant que les transports sont assez rapides (cf. figure IV.24). Le ralentissement des transports entraîne une diminution des stocks amont *m18* et *m13* des producteurs 1 et 2 respectivement (cf. figure IV.25). Toutefois, les processus de fabrication des ces derniers ne sont pas encore affectés et leur stock aval reste toujours constant.

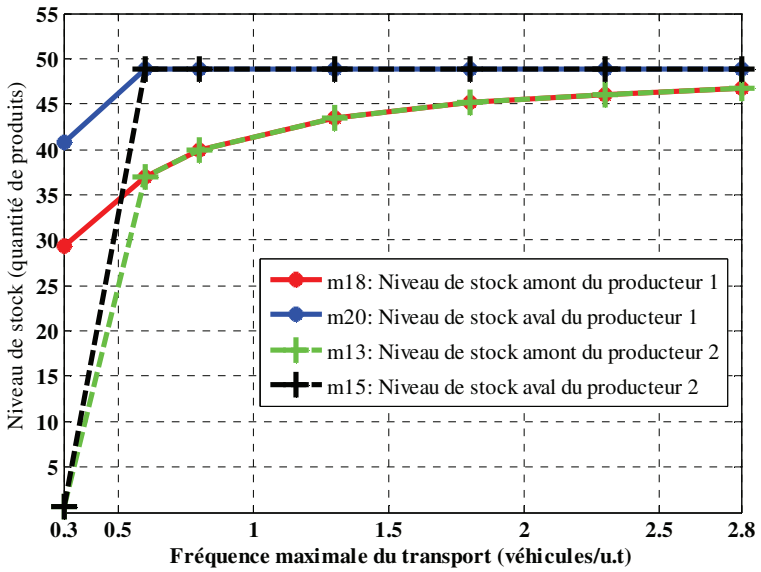


Figure IV.25 : *Niveaux des stocks des producteurs 1 et 2 en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs.*

Le fait que le transport atteigne le débit 0.57 véhicules/u.t, provoque une perturbation au niveau des producteurs 1 et 2 et par conséquent, une diminution au niveau de leurs stocks aval. Ce changement se propage tout au long du réseau, en provoquant une diminution au niveau des stocks, comme le montre la figure IV.26 concernant les stocks des distributeurs 1 et 2.

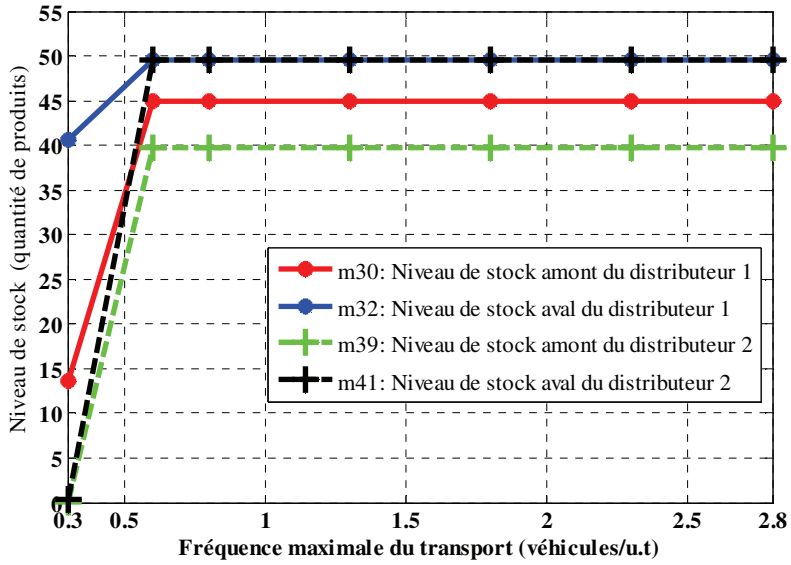


Figure IV.26 *Niveaux des stocks des distributeurs en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs.*

Cette diminution du niveau de la plupart des stocks d'un côté et la satisfaction persistant des demandes des clients d'un autre côté, provoque une diminution du coût global. Au-dessous de la fréquence maximale *0.5 véhicules/u.t* de transport, les demandes des clients 2 et 3 commencent à se cumuler et le coût global s'en ressent immédiatement du fait des pénalités.

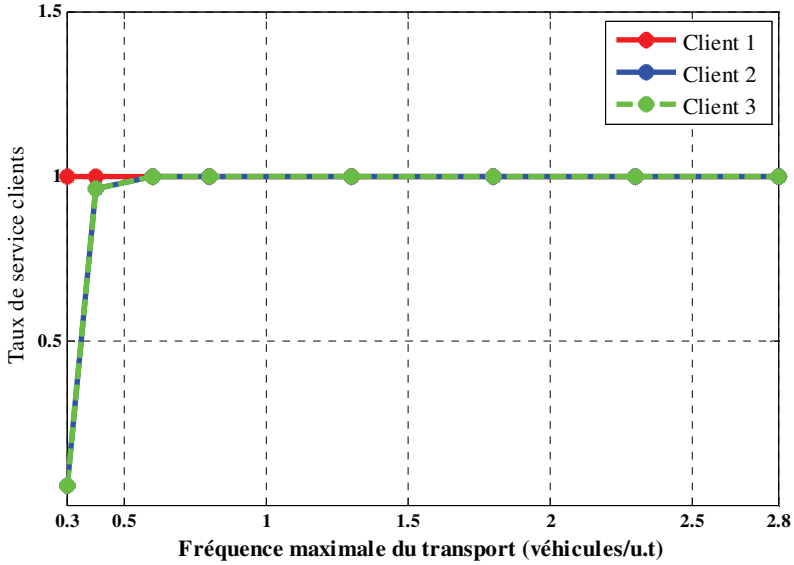


Figure IV.27 *Taux de service en fonction de la fréquence maximale des transports entre les différents fournisseurs et producteurs.*

5.4 Analyse des effets de la variation des demandes clients finaux

Étudions à présent, l'effet de la variation de la demande du client 1 sur le taux de service, le temps de séjour des produits dans le réseau et les niveaux de stocks. Pour ce faire, nous faisons varier uniquement le débit de demandes du client final 1 et nous fixons le débit des clients finaux 2 et 3 à 1.2 produits/u.t.

L'examen de la courbe de la figure IV.28 montre que lorsque la demande du client 1 est très faible, le temps de séjour devient très élevé en raison de l'écoulement très lent du flux de produits. En effet, les produits passent énormément de temps en attente dans les stocks. La figure IV.29 montre, à son tour, que les niveaux des stocks aval des distributeurs sont à la valeur maximale déterminée par la limite de la taille de la boucle Kanban. Ce qui traduit une surdimension du réseau par rapport à la demande.

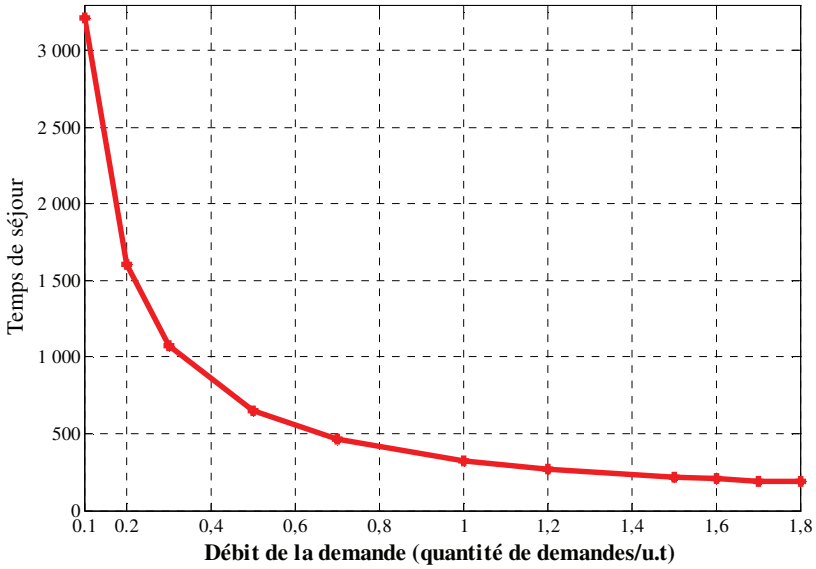


Figure IV.28 *Temps de séjour dans le réseau en fonction de la demande du client final 1.*

L'augmentation du débit de la demande du client final 1 entraîne une diminution du temps de séjour dans le réseau. Jusqu'au débit de demande *0.7 produits/u.t*, la situation est la même et à partir de ce dernier jusqu'au débit *1.35 produits/u.t*, le temps de séjour continue de diminuer mais moins vite. Dans cette partie, la capacité du réseau permet de satisfaire le mieux possible la demande du client. En effet, l'écoulement du flux de produits devient plus rapide et les stocks des distributeurs 1 et 2 ont tendance à diminuer sur la figure IV.29.

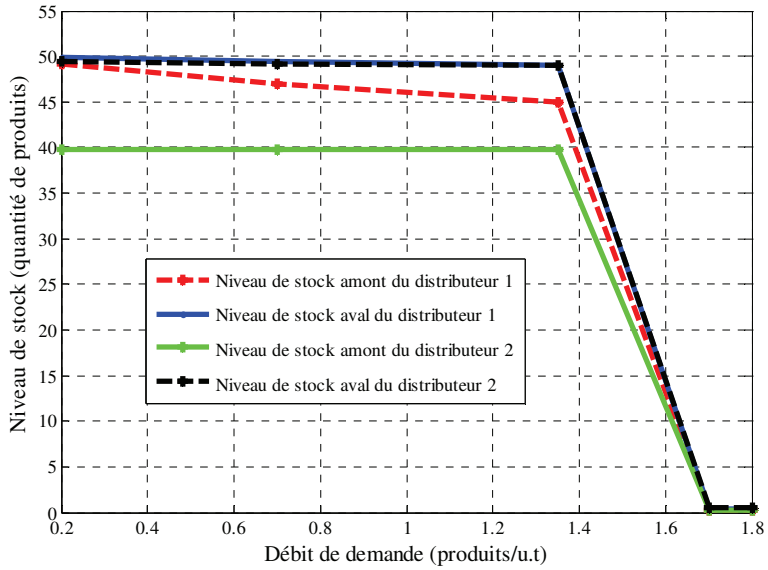


Figure IV.29 *Niveaux des stocks des distributeurs 1 et 2 en fonction de la demande du client final 1.*

Le fait que la fréquence maximale de préparation des commandes au niveau des distributeurs (*7 produits/u.t*) soit plus rapide que celui de l'assemblage (*3.8 produits/u.t*) a pour conséquence que seuls les stocks amont sont impactés au niveau des distributeurs. Toutefois, lorsque la demande client devient supérieure à *1.35* l'assembleur n'arrive plus à satisfaire les demandes des deux distributeurs et son stock aval *m26* tombe au minimum. Par conséquent, une rupture d'approvisionnement (pénurie) atteint tout les acteurs en aval de cet assembleur (cf. figure IV.29).

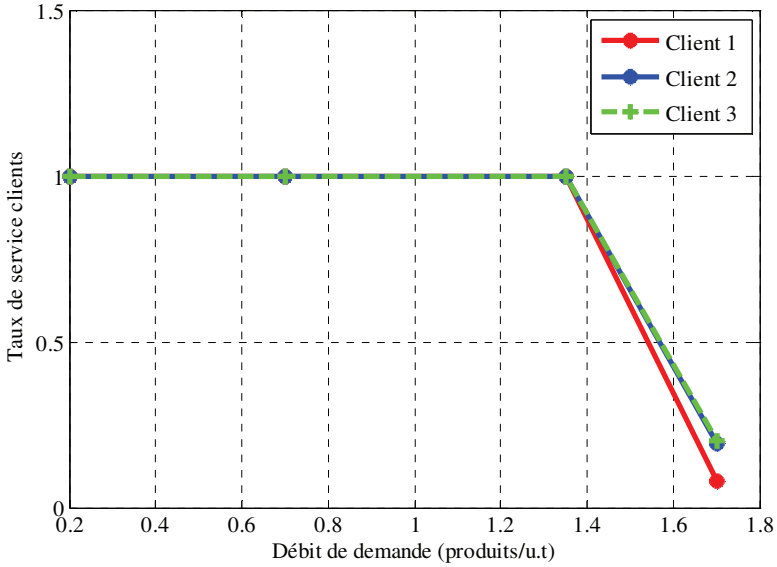


Figure IV.30 *Taux de service en fonction de la demande.*

Par conséquent, le taux de service clients diminue comme le montre la figure IV.30. Ainsi, le réseau devient incapable de satisfaire les demandes des clients à partir de l'instant où une demande dépassant *1.7 p/u.t*.

Notons que lorsque la pénurie augmente, elle conduit à un temps de séjour des produits dans le réseau très réduit, dû au fait que les produits circulent à travers les différents acteurs du réseau logistique sans séjourner dans les stocks afin de satisfaire la demande des clients très élevée.

Au regard de ces résultats, l'indication principale est que la capacité du réseau à satisfaire les demandes des clients sans avoir trop de stocks est une condition importante pour un meilleur rendement du fonctionnement du réseau.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons apporté, dans un premier temps, des éléments pour une validation du comportement dynamique du modèle RdPCV global de la chaîne logistique que nous avons proposé. Dans un deuxième temps, nous avons illustré l'intérêt du modèle dans l'analyse et l'évaluation de performance des chaînes logistiques. A cet égard, la richesse dynamique du modèle RdPCV global de la chaîne logistique développé, et sa formalisation explicite de l'articulation entre les décisions à prendre et les différentes mesures disponibles sur l'état du système et son environnement, a permis d'évaluer aisément d'importants indices de performances de la chaîne.

L'ensemble de la démarche globale que nous avons développée à été appliqué à un cas de chaîne logistique issue de la littérature. Son modèle RdPCV global a été établi et mis en œuvre puis a été utilisé pour analyser cette chaîne.

Les différents phénomènes de l'écoulement des flux de produits et d'information dans la chaîne logistique ont été reproduits. L'évolution en fonction du temps de l'état de la chaîne logistique a été décrite et analysée en termes de la quantité instantanée de produits réceptionnée, en cours de transformation ou stockée, de quantité de demande, de débit, de pénuries,…à travers les différents acteurs de la chaîne logistique et les vecteurs de transport assurant leur interconnexion.

Pour illustrer la manière dont le modèle RdPCV global peut aider à apporter des informations nécessaires, afin d'aider à la prise d'une décision ou d'évaluer la qualité des décisions prises pour notre cas de la chaîne logistique, nous avons procédé à l'évaluation de performance de cette chaîne. Nous nous focalisons dans cette démarche sur les indices de

performances associés à notre modèle RdPCV global de la chaîne logistique. Dans ce sens, nous avons analysé les effets des différents paramètres du modèle RdPCV global de la chaîne : effets de la variation des débits de demandes, effets de la variation du débit de transport, effets de la variation du nombre de kanbans et sensibilité de la chaîne logistique étudiée aux conditions initiales. Le diagnostic de quelques aspects de la dynamique de cette chaîne et les causes des pertes de performance de certaines d'entre elles ont été présentés.

SYNTHESE ET PERSPECTIVES

SYNTHESE DES TRAVAUX

Le contexte général de notre étude, dans cette thèse, est celui de la gestion de la chaîne logistique ou Supply Chain Management "SCM" où nous avons abordé la problématique de modélisation et d'analyse. L'originalité de nos travaux réside dans l'utilisation des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable (RdPCV) afin de développer un modèle de simulation macroscopique continu et dynamique de la chaîne logistique permettant d'intégrer à la fois l'aspect physique, informationnel et décisionnel de cette chaîne tout en procédant par une démarche modulaire et générique. Un tel modèle permet d'aborder les principaux aspects du Supply Chain Management.

En effet, une analyse de la littérature nous a permis d'identifier le peu de travaux répondant à l'exigence du concept du Supply Chain Management d'adopter une vision globale de la chaîne logistique. Bien que l'approche globale elle-même, pour l'étude de la chaîne logistique, soit souvent évoquée, cependant, elle est fréquemment limitée en raison du nombre important de ressources à mettre en jeu, même avec l'utilisation des techniques de simulation les plus répandues, comme la technique de simulation à événements discrets. D'un autre côté, la majorité des modèles de la chaîne logistique existants sont restreints à des classes particulières de chaînes logistiques et très peu de travaux proposent des modèles génériques, pouvant s'adapter à la grande diversité de ces chaînes ou servir de base à l'instanciation de différents cas d'étude similaires. C'est dans ce contexte que nous avons essayé d'enrichir les modèles de la chaîne logistique existants en proposant le modèle décrit ci-dessus.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord présenté la chaîne logistique comme un système complexe qui fonctionne selon une logique de réseaux, composés de nœuds interconnectés par des arcs où les nœuds représentent les différents acteurs de la chaîne logistique et les arcs représentent les vecteurs de transports et d'échanges informationnels reliant les acteurs.

Chaque acteur a été présenté, à son tour, selon l'approche systémique, comme une composition de :

- sous-système physique qui peut être vu comme un réseau de ressources élémentaires en interaction entre elles, invoquant deux processus de stockage, amont et aval, et également un processus de transformation qui se charge de la fonction principale de l'acteur, consistant à amener des modifications dans les caractéristiques du flux de produits pour atteindre, au final, les valeurs attendues par les clients du contact aval de l'acteur considéré ;
- et sous-système de pilotage qui sert à adapter l'acteur à son environnement en générant un plan d'action autour de trois principaux engagements : livraison, transformation et réapprovisionnement. Ces engagements doivent tenir compte de l'état du sous-système physique de l'acteur considéré, de l'état de son transport, des demandes de ses clients environnants et des politiques de pilotage adoptées.

Ce cadre conceptuel propre à tous les acteurs de la chaîne logistique, montre bien que ces acteurs ont une structure comparable, même s'ils s'articulent différemment et génèrent des flux de volumes et de fréquences différents. A chaque connexion entre deux acteurs est associée une structure de transport suffisamment macroscopique pour servir de base à la présentation générique des différents modes de transport. Dans cette structure, la connexion entre deux acteurs est mise en œuvre à travers une infrastructure et un ensemble de véhicules assurant l'acheminement des produits à partir du stock aval de l'acteur fournisseur jusqu'au stock amont de l'acteur client.

C'est sur la base de ces concepts génériques que nous avons développé les deux modèles RdPCVs élémentaires génériques associés aux acteurs et aux vecteurs de transport de la chaîne logistique. D'un côté, le modèle RdPCV générique de l'acteur s'adapte facilement aux spécificités des différents acteurs de la chaîne logistique et à leur instanciation. Il permet de décrire le comportement dynamique des flux transitant par l'acteur ainsi que l'interaction de ce dernier avec son environnement (ses contacts amont et aval). Autrement dit, le modèle RdPCV de l'acteur doit expliciter :

- l'organisation des différents processus au niveau du sous-système physique ;
- l'ensemble des informations émises en direction du sous-système de pilotage;
- les principaux engagements de ce sous-système de pilotage envers l'environnement et le sous-système physique ;

- et la politique de pilotage de flux adopté, par l'acteur, permettant de déterminer quand et pour quelle quantité envisager un engagement.

D'un autre côté, le modèle RdPCV générique du transport s'adapte aux spécificités des différents types de couples (infrastructure-véhicule) et il permet d'assurer le transfert des produits à travers l'infrastructure de transport tout en tenant compte de la vision flux de véhicules au lieu de celui de produits. En effet, cette vision permettra de décrire le transport des produits sur une infrastructure en fonction de l'état de tout le trafic de véhicules sur cette dernière.

Le modèle RdPCV global de la chaîne logistique peut être obtenu ensuite par l'assemblage de l'ensemble des modèles RdPCVs élémentaires associés aux acteurs et aux vecteurs de transport tout en respectant les règles d'assemblage définies dans ce cadre afin d'assurer une certaine logique de cheminement des flux de produits.

Un tel modèle générique comportant les éléments essentiels décrivant la dynamique des flux dans la chaîne logistique permet d'aborder les principaux aspects du Supply Chain Management en appréhendant cette chaîne logistique sous ses différents aspects, qu'ils soient structurels, fonctionnels, comportementaux, informationnels et décisionnels. Il apporte aux décideurs responsables de la chaîne logistique une lisibilité en termes d'analyse des interactions, et donne une vision globale plus claire de l'état de la chaîne, facilitant ainsi toute mesure d'exploitation, que ce soit au niveau stratégique, tactique ou un certain niveau opérationnel.

Pour terminer, l'ensemble de la démarche globale que nous avons développée à été appliqué sur un cas de chaîne logistique. Son modèle RdPCV global a été établi et mis en œuvre puis a été utilisé pour analyser cette chaîne.

Les différents phénomènes de l'écoulement des flux de produits et d'information dans la chaîne logistique ont été reproduits. L'évolution en fonction du temps de l'état de la chaîne logistique a été décrite et analysée en termes de la quantité instantanée de produits réceptionnée, en cours de transformation ou stockée, de quantité de demande, de débit, de pénuries,…à travers les différents acteurs et les vecteurs de transport assurant leur interconnexion.

Pour illustrer la manière dont le modèle RdPCV global peut aider à apporter des informations nécessaires afin d'aider à la prise d'une décision ou d'évaluer la qualité des décisions prises, nous avons procédé à l'évaluation de performance de la chaîne logistique.

Nous insistons dans cette démarche sur les indices de performances associés à notre modèle RdPCV global de la chaîne logistique. Dans ce sens, nous avons analysé les effets des différents paramètres du modèle RdPCV global de la chaîne : effets de la variation des débits de demandes, effets de la variation du débit de transport, effets de la variation du nombre de kanbans et sensibilité de la chaîne logistique étudiée aux conditions initiales. Le diagnostic de quelques aspects de la dynamique de de cette chaîne et les causes des pertes de performance de certaines d'entre elles ont été présentés.

PERSPECTIVES

Nous avons montré, à travers ce travail, l'intérêt d'utiliser le modèle RdPCV global de la chaîne logistique. De nombreuses questions, dans ce contexte, restent encore à étudier, tant au niveau de la modélisation qu'au niveau de l'exploitation du modèle proposé (pilotage, supervision, hybridation, etc.).

Au niveau de la modélisation, il serait intéressant, dans un premier temps, de valider le modèle avec d'autres politiques de pilotage du flux en utilisant l'expérimentation par simulation. Une validation terrain reste toutefois incontournable que ce soit pour le cas Kanban ou pour d'autres politiques de pilotage. Une telle application de notre modèle sur un cas réel permettra une amélioration du modèle grâce aux suggestions de praticiens du Supply Chain Management.

Dans un second lieu, il serait intéressant de prendre en compte la définition large de la chaîne logistique. Comme nous l'avons mentionné, une chaîne logistique s'étend au-delà des limites de la filière de production qui se focalise sur le produit pour traiter d'autres types d'objets (information, client, patient, véhicule, appel téléphonique, etc.) allant des fournisseurs des fournisseurs jusqu'aux clients des clients. Cette définition suggère que nous sommes en présence de plusieurs domaines et plusieurs métiers ou secteurs (usines de production, banques, cabinets de services, hôpitaux, compagnies d'assurance, etc.). Ainsi, il serait intéressant d'élargir le domaine d'application de notre modèle à d'autres types de chaîne logistique.

D'autres questions méritent un traitement plus approfondi. C'est notamment le cas du transport afin de le rendre plus réaliste en tenant compte de l'état de tout le trafic de véhicules sur l'infrastructure servant au cheminement des produits. D'un autre côté, plusieurs suppositions sont faites, dans un souci de simplification, dissimulant ainsi certains éléments à creuser comme le cas de flux hétérogène (ou cas multi-produits) et la nature stochastique

d'arrivée des commandes clients. Par ailleurs, la prise en compte de l'aspect économique, est totalement absente dans notre modèle pour l'instant. En effet, sur le modèle actuel sont représentés seulement les flux de produits et d'information. Introduire les flux financiers pour le calcul des coûts permettrait d'avoir une modélisation plus exhaustive. Nous envisageons aussi l'implantation d'un logiciel permettant la construction du modèle RdPCV global de la chaîne logistique.

Au niveau de l'exploitation des modèles, vu les caractéristiques qu'offre le modèle RdPCV global de la chaîne logistique (possibilité de reproduire facilement les caractéristiques du cheminement des produits au sein de la chaîne logistique, simplification importante des techniques d'analyse, etc.), des contributions significatives peuvent être apportées au niveau de :

- L'optimisation de la chaîne logistique :

Il est également envisageable de dépasser la question de l'analyse à celle de l'optimisation, en connectant le modèle RdPCV à un programme d'optimisation afin d'évaluer, grâce à la simulation une fonction objectif mesurant la qualité de la solution proposée. Le programme d'optimisation se chargerait, quant à lui, de modifier à chaque itération les paramètres d'entrée du modèle RdPCV (les capacités et les débits maximaux par exemple).

- La commande et le contrôle de la chaîne logistique :

En effet, l'utilisation d'une seule mesure de commande isolée localement dans une chaîne logistique, s'avère inefficace pour alléger ou éliminer les différents nuisibles dans cette chaîne. Dans plusieurs configurations, la mise en œuvre d'une commande locale au niveau de chaque acteur de la chaîne peut produire un effet inverse en conduisant à la formation de différents problèmes dans d'autres endroits du réseau (des goulets d'étranglement, de surcharges, de pénuries,…). D'où l'importance d'un modèle global de la chaîne logistique qui permet d'envisager une stratégie de commande intégrée au niveau de la chaîne dans sa globalité afin de choisir la combinaison optimale, qui tient compte de l'état global de cette chaîne, pour de meilleures performances de l'ensemble des acteurs . Une telle stratégie de commande peut être axée sur la conception d'une commande utilisant l'approche multi-modèle, en considérant la représentation graphique du modèle RdPCV de la chaîne logistique considérée). Nous envisageons aussi dans ce contexte d'exploiter notre modèle en utilisant les techniques de la commande optimale, qui consistent à chercher une commande minimisant un

critère donné ou une sortie désirée pour notre système (dates de livraisons au plus tard, niveau des stocks, temps de stockage, coûts, …).

- L'hybridation du modèle RdPCV global de la chaîne logistique :

Par la suite, notre approche pourrait être adaptée pour le développement d'un modèle hybride, qui combinerait simultanément la sémantique d'un RdPCV et celle d'un RdP discret au sein d'une même structure. Dans ce contexte, le flux de produits peut être modélisé par un RdP continu, tandis que les événements qui peuvent survenir ainsi que les interactions entre les entités, peuvent être modélisés par les réseaux de Petri discrets. Ce qui permet donc de représenter l'influence de ces événements sur le processus continu. Une telle structure permettrait de tenir compte de plusieurs aspects de la chaîne logistique dans le détail comme par exemple les phénomènes de discontinuités et d'aléas. Une telle extension permettrait d'élargir l'application de notre modèle au niveau opérationnel du Supply Chain Management.

BIBLIOGRAPHIE

[Abouaissa et Join, 2008] Abouaissa H. et Join C., « Modélisation macroscopique du flux de trafic basé sur l'estimation paramétrique des modèles bond graphs ». 7ième Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'08, Paris – France, 2008.

[Ageron, et al., 2012] Ageron, B., Gunasekaran, A., Spalanzani, A. « *Sustainable supply management: An empirical study* » Int. J. Production Economics, 140(1), p. 168–182, 2012.

[Agrawal et al., 2007] Agrawal S., Sengupta R.N., Shanker K. « *Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory* ». European Journal of OperationalResearch, 192(2), pp. 576-593, 2008.

[Akbari Jokar, 2001] Akbari Jokar M.R. « *Sur la conception d'une chaîne logistique une approche globale d'aide à la décision* », université de Grenoble, 2001.

[Alkassem, 2007] Alkassem K. « *Evaluation et pilotage des flux manufacturiers : réflexions et propositions* », Thèse de doctorat, U.F.R. Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique Ecole Doctorale IAEM Lorraine Département de Formation Doctorale Automatique l'Université Henri Poincaré, Nancy I. 142 pages. 2007.

[Alla et David, 1998] Alla, H. and David, R. « *Continuous and hybrid Petri Nets* ». Journal of Circuits, Systems, and Computers 8, 159–188, 1998.

[Altiparmak et al., 2006] Altiparmak F., Gen M., Lin L. et Paksoy T. « *A genetic algorithm approach for,multi-objective optimization of supply chain networks* ». Computers & Industrial Engineering, In Press, 2006.

[Amer Yahia et al., 1997] Amer Yahia C., Zerhouni N., Ferney M., El Moudni A. « *Modelling of Biological Systems by Continuous Petri Nets* », 15th IMACS World Congrees on Scientific Computation Modelling and Applied Mathematics, Berlin, Vol. 4, pp. 383-388, august 1997.

[Amer-Yahia et al., 1995] Amer-Yahia C., Zerhouni N ., El Moudni A., et Ferney M. « State equation and stability of a class of *Continuous Petri Net. Application to manufacturing lines* ». Proceedings INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA'95, Paris, France,October 10-13, pp 313-321, 1995.

[AMICE, 1993] AMICE CIMOSA « *Open System Architecture for CIM* », 2nd revised and extended edition. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

[Amiri, 2006] Amiri A. « *Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure* ». European Journal of Operational Research. Vol.171, p.567-576, 2006.

[Amrah et al., 1996] Amrah A., Zerhouni N., El Moudni A. « *Constrained state feedback control of a class of Discrete Event Systems modeled by Continuous Petri Nets* », ICRACV '96, Westin Stamford, Singapore, december 1996.

[Amrah et al., 1998] Amrah A., Zerhouni N., El Moudni A. « *On the control of manufacturing lines modelled by controlled Continuous Petri Nets* », International Journal of Systems Science, vol. 29, n^0 2, pp. 127-137, 1998.

[Amrah, 1998] Amrah A. « *Contribution à l'analyse et à la commande des Systèmes à événement Discrets par une approche Continue : Application aux Systèmes de Production modélisés par Réseaux de Petri* », Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté, 1998.

[Anderson et Morrice, 1999] Anderson E.G. and Morrice D. « *A Simulation Game for Service-Oriented Supply Chain Management* » (Under review by the Journal of Production and Operations Management), 1999.

[Arda, 2008] Arda Y. « *Politiques d'approvisionnement dans les systèmes à plusieurs fournisseurs et Optimisation des décisions dans les chaînes logistiques décentralisées* ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[Armbruster et al., 2004] Armbruster, W.S., Pelabon, C., Hansen, T.F. et Mulder, C.P.H. « Floral integration, modularity, and accuracy: distinguishing complex adaptations from genetic constraints ». In: Phenotypic Integration: Studying the Ecology and Evolution of Complex Phenotypes (M. Pigliucci & K. Preston, eds), pp. 23–49.Oxford University Press, New York, 2004.

[Arns et al., 2002] Arns M, Fischer M, Kemper P, and Tepper C., « *Supply chain modeling and its analytical evaluation* », Journal of Operational Research Society, 53, pp. 885-894, 2002.

[Aviv, 2002] Aviv, Y. « *Gaining Benefits from Joint Forecasting and Replenishment Processes: The Case of Auto-correlated Demand* », Manufacturing & Service Operations Management, vol. 4, pp. 55-74, 2002.

[Azapagic er Perdan, 2000] Azapagic, A., Perdan, S. « *Indicators of sustainable development for industry: a general framework* ». Trans. IChemE (Proc. Safety Envir. Prot.) Part B 2000 78 (B4), 243 – 261, 2000.

[Babaï, 2005] Babai, M.Z. « *Politiques de pilotage de flux dans les chaînes logistiques : impact de l'utilisation des prévisions sur la gestion des stocks* ». Thèse de doctorat, Laboratoire Génie Industriel, École, Central Paris, 2005.

[Balduzzi et al., 2000] Balduzzi F., Giua G., Menga G. « *First order hybrid Petri nets: a model for optimization and control* », IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, N° 4, pp. 382–399, 2000.

[Balduzzi et al., 2001] Balduzzi F., Giua G., Seatzu C., « *Modeling and simulation of manufacturing systems with first order hybrid Petri nets* », International Journal of Production Research, Vol. 39, N° 2, pp. 255–282, 2001.

[Banks, 1998] Banks J. « *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice* ». John Wiley, New York, 1998.

[Barlas et Aksogan, 1996] Barlas Y., Aksogan A. « Production diversification and quick response order strategies in Supply Chain Management ». Proceedings of the conference System Dynamics'96, Cambridge, Massachussets, July 21-25, p 51-54, 1996.

[Baumann, 2011] Baumann E.C. « *Modèles d'évaluation des performances économique, environnementale et sociale dans les chaînes logistiques* » Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2011.

[Beamon et Chen, 2001] Beamon B.M. et Chen V.C.P. « *Performance analysis of conjoined supply chains* ». International Journal of Production Research. Vol.15, p.3195-3218, 2001.

[Beamon, 1999] Beamon B.M. « *Measuring supply chain performance* ». International Journal of Operations & Production Management. Vol. 19, N°. 3, p. 275-292, 1999.

[Bel et al, 1996] Bel G., Bensana E., Rota K., Sarocchi B. « *Strategic decision making in production planning with genetic algorithms* », Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology (CIMAT'96), INPG, France, 1996.

[Bel, 2008] Bel G. « *Comparaison et coopération entre simulation et optimisation des systèmes discrets* ». 7e Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, Paris, 2008.

[Benmansour et al., 2004] Benmansour S., Benabdelhafid A., Boukachour J., Boudebous D. «*Bond graph for robust modelling of manufacturing systems*», Proceedings of the International Conference on Computational Cybernetics, IEEE ICCC '04, pp. 291-295 ,Vienna, Austria, 2004.

[Benmansour et al., 2006] Benmansour S., Benabdelhafid A., Boukachour J., Boudebous D. « *New Modelling Approach For Traffic Flow By Using The Bond Graph* », IEEE ICIT2006, Mumbai, India, 2006.

[Benmansour et al., 2011] Benmansour S., Benabdelhafid A., « *Bond Graph model of the physical flow Transfer within a supply chain* », IEEE International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport "MSLT 2011" May 31, 2011 – June 3, Hammamet, Tunisia, 2011.

[Bensedik, 1996] Bensedik T., Besombes B., Marcon E., Long J. « *Bond graphs for technico-economic approach of production systems modeling*». CESA'96, pp.309 -314, Lille (France), Juillet 1996.

[Bernhard et al., 2005] Bernard M, Cartron G, Rachieru P, LeMevel A, Branger B, Le Maignan C, Berthou C, Ghandour C, Delwail V, Milpied N, « Long-term outcome of localized high-grade non-Hodgkin's lymphoma treated with high dose CHOP regimen and involved field radiotherapy: results of a GOELAMS study ». Haematologica ; 90 : 802-809, 2005.

[Berrah et al., 2000] Berrah L., Mauris G., Foulloy L., Haurat A. « *Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach* », Computers in Industry, N° 43, p. 221-225, 2000.

[Berrah, 1997] Berrah L. « *Une approche d'évaluation de la performance industrielle : modèles d'indicateurs et techniques floues pour un pilotage réactif* », Thèse de doctorat de l'INPG, 1997.

[Berrah, 2002] Berrah, L. « *L'indicateur de performance, Concepts et applications* ». Cépaduès-Editions, Toulouse, 2002.

[Berry et Naim, 1994] Berry D. et Naim M.M. « *A systems engineering analysis of information and material flows in a manufacturing company* ». Factory 2000 - Advanced Factory Automation, Conference Publication N° 398, 1994.

[Besombes et al., 1997] Besombes B., Marcon E., Long J., « *A modular approach for modeling of manufacturing systems with bond graph: single-part-type systems* », IFAC'97,vol 1/3, pp. 249-254, Belfort (France), may 1997.

[Bhushan et Gummaraju, 2002] Bhushan N., and Gummaraju K., « *A Petri Net Based Simulation Approach for Evaluating Benefits of Time Temperature Indicator and Wireless Technologies in Perishable Goods Retail Management* », FOODSIM'2002, The Second International Conference on Simulation and Modeling in the Food and Bio-Industry, June 17-18, 2002.

[Biswas et Narahari, 2004] Biswas S., Narahari Y. « Object *oriented modeling and decision support for supply chains* ». European Journal of Operational Research 153(3): 704-726, 2004.

[Bitton, 1990] Bitton M., 1990, « *ECOGRAI: Méthode de conception et d'implantation de systems de mesure de performance pour organizations industrielles* ». Thèse de doctorat en automatique – Université Bordeaux1.

[Bollon, 2001] Bollon J.M. « *Etude de différentes politiques de pilotage de systèmes de production* » . Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2001.

[Booch et al., 1997] Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J., « *Unified Modeling Language Specifications* » - version 1.1. UML consortium - Object Management Group. Rapport technique, 1997.

[Borne et al., 1992] Borne P., Dauphin-Tanguy G., Richard J.P., Rotella F., Zambettakis I. « *Modélisation et identification des processus* », Technip, Paris, France, 1992.

[Botta-Genoulaz et al., 2008] Botta-Genoulaz V., Lamothe J., Pirard F., Riane F. et Valla A. « *Simulation à évènements discrets pour la gestion de chaînes logistiques* ». Chapitre 3 de : La simulation pour la gestion des chaînes logistiques, Lavoisier, Hermes Science Publications, 2008.

[**Boudebous et al., 2011**] Boudebous D., Boukachour J., Benmansour S., **Smata N.** « *Design of industrial process command systems using Petri nets* ». 9th International Workshop on Modelling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems (MSVVEIS 2011). 8-11 June, 2011 – Beijing, China.

[Bourrières et al., 2005] Bourrières J.P., Grabot B., et Mercé C. « *Pilotage des systèmes multisite de production : outils industriels et méthodes avancées* ». Techniques de l'Ingénieur, S7662, 15 pages, Septembre 2005.

[Bousquet, 2001] Bousquet F. « *Modélisation d'accompagnement. Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables*». Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Lyon 1, 2001.

[Brewer, 1991] Brewer J.W. *« progress in the bond –graph representation of economics and population dynamics »*, J. Franklin Inst, vol. 328, no 5/6, pp. 675-696, june, 1991.

[Bruniaux, 1999] Bruniaux R., Pierreval H., Caux C. « *Simulation Supply Chain with System Dynamics* », 11th European Simulation Symposium, SCS, Erlangean, Germany, october 26-28, pp. 209-213, 1999.

[Bruniaux, 2000] Bruniaux R. « *Simulation continue de réseaux de sites industriels application aux chaînes logistiques dans le secteur automobile* » Thèse de doctorat, spécialité productique. Université Clermont-Ferrand 2, 2000.

[Burlat et Boucher, 2003] Burlat P., Boucher X. « *Une utilisation de la théorie des sous-ensembles flous pour le calcul d'indicateurs de performance* », MOSIM, Toulouse, 2003.

[Byrne et Heavey, 2006] Byrne P.J., Heavey C. « *The impact of information sharing and forecasting in capacitated industrial supplychains: A case study* ». International Journal of Production Economics, 103(1), pp. 420-437, 2006.

[Cachon et Lariviere, 2001] Cachon G.P. et Lariviere M.A. « *Contracting to Assure Supply: How to Share Demand Forecasts in a Supply Chain* ». Management Science. Vol. 47, N° 5, p. 629–646, 2001.

[Camm et al., 1997] Camm J.D., Chorman T., Sill F., Evans J., Sweeney D. et Wegryn. « *Blending OR/MS judgment, and GIS: Restructuring P&G's supply chain* ». Interfaces, Vol.27, p.128-142, 1997.

[Castagna, 2004] Castagna P. « *Contribution à la modélisation, la simulation et la commande de systèmes de production et de transitique* », Habilitation à diriger des recherches, Université de Nantes, 2004.

[Caux, 2006] Caux C. « *Rationalisation des flux dans les systèmes de production* », Habilitation à diriger des recherches, Université de Clermont-Ferrand, 2006.

[Cerutti et Gattino, 1997] Cerutti O., Gattino B. « *Indicateur et tableaux de bord* », 3e édition, AFNOR gestion, Paris, 1997.

[Chan et Qi, 2003] Chan F.T.S., Qi H.J. « *An innovative performance measurement method for supply chain management* », Supply Chain Management: An International Journal 8 (3–4) 209–223, 2003.

[Chan, 2003] Chan F. T. S. « *Performance Measurement in a Supply Chain* », International Journal Advanced Manufacturing Technology, vol. 21, pp.534–548, 2003.

[Chanut, 2005] Chanut S. « *Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers : trucks and cars* ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2005.

[Chapurlat, 2007] Chapurlat V. « *Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise* », Habilitation à Diriger des Recherches, Université Montpellier II, 1er mars 2007.

[Chardine-Baumann, 2011] Chardine- Baumann E. « *Models for assessing economic, environmental and social performances in supply chains* ».Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 243 p., 2011.

[Chatfield et al, 2005] Chatfield, C.H., Koo, H., et Quivey, R.G., Jr. « *The putative autolysin regulator LytR in Streptococcus mutans plays a role in cell division and is growth-phase regulated* ». Microbiology, 151(2) : 625–631. Doi : 10.1099/mic.0.27604-0. PMID : 15699211, 2005.

[Chen et al., 2000] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J.K. et Smichi-Levi D. « *Quantifying the Bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information* ». Management Science, vol. 46, no. 3, pp. 436-443, 2000.

[Chen et al., 2007] Chen M.C., Yang T., Yen C.T. « *Investigating the value of information sharing in multi-echelon supply chains* ». Quality and Quantity, 41(3), pp. 497-511, 2007.

[**Cheyroux, 2003]** Cheyroux L. « Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques ». Thèse de Doctorat en Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications et Signal, Université de Grenoble, 2003.

[Chopra et Meindl, 2001] Chopra et Meindl, « *Supply chain management: Strategy, planning and operation* »,2nd Edition, Prentice Hall.0-13-121745-3, 2004.

[Chretienne, 1983] Chretienne P. « *Les réseaux de Petri temporisés* ». Thèse d'état (1983). Uinversite de ParisVI.

[Christopher, 1998] Christopher M. « *Strategies for reducing costs and improving service*», *Logisticsand Supply chain management*, London : Prentice Hall, 1998.

[Christy et Grout, 1994] Christy D. P. et Grout J.R. « *Safeguarding supply chain relationships* », International Journal of Production Economics N° 36 p 233-242, 1994.

[Chu et Lee, 2006] Chu W.H.J., Lee C.C. « *Strategic information sharing in a supply chain* ». European Journal of Operational Research, 174 (3), pp. 1567-1579, 2006.

[Clivillé, 2004] Clivillé V. «*Approche systémique et méthode multicritère pour la definition d'un système d'indicateurs de performance* », Thèse de doctorat. Savoie, France : Université de Savoie, 2004.

[Cohen et Lee, 1989] Cohen M. A. et Lee H.L. « *Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks* », Journal of Manufacturing and Operations Management N°2 p 81- 104, 1989.

[Courtois et al, 1995] Courtois A., Martin-Bonnefous C. et Pillet M. « *Gestion de Production* ». Les éditions d'organisations, 3ème édition, Paris, 1995.

[Crespo Marquez et al., 1993] Crespo-Márquez A., Usano R.R. and Aznar R.D. « *Continuous and Discrete Simulation in a Production Planning System. A Comparative Study* », Proceedings of International System Dynamics Conference, Cancun, Mexico, p. 58, The System Dynamics Society, 1993.

[D'amours et al., 2007] D'Amours S., Forget P., Frayret J-M. « Multi- *behavior Agent Model for Planning in Supply Chains: An Application to the Lumber Industry* », Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Journal, 2007.

[Danish et al., 2008] Danish I., Xu X., and Deng S. C. « *A SCOR Reference Model of the Supply Chain Management System in an Enterprise* ». The International Arab Journal of Information Technology, Vol. 5, No. 3, July 2008.

[Dauphin-Tanguy, 2003] Dauphin Tanguy G., « *Les Bond Graphs* », Paris, Hermès Science Publications, 2003.

[Davenport, 1993] Davenport, T. H. « *Process innovation; reengineering work through information technology* ». Boston, Harvard Business School Press, 1993.

[David et Alla, 1987] David R., & Alla H. « *Continuous Petri Nets* ». In Proceedings of the 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets (pp. 275–294), Zaragoza, Espagne, 1987.

[David et Alla, 1989] David R., Alla H. « *Du grafcet aux réseaux de Petri* ». Traité des Nouvelles Technologies Série Automatique. HERMES, 1989.

[David et Alla, 1992] David R. and Alla H. « *Du grafcet aux réseaux de Petri* ». Hermès, Paris. 1992.

[De Rosnay, 1975] De Rosnay J. « *Le macroscope, Vers une vision globale, Points, Seuil* », 1975.

[Dégrés et al., 2005] Dégrés L., Pierreval H., Caux C., « *Analysis of the effects of the variation in the demand of products in a Steel Industry: a System Dynamics approach* », In Proceeding of International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2005, pp. 894 – 903, 2005.

[Demazeau et Müller, 1990] Y. Demazeau et J.P. Müller. « *Decentralized Artificial Intelligence* ». Yves Demazeau and Jean-Pierre Müller (Eds), Elseiver Science Publisher, pp: 3-16. 1990.

[Dembélé et Lhote,1995] Dembélé S., Lhote F. « *Analyse et représentation par bond praphs des fonctions d'écoulement de flux de produit manufacturés*», APII, vol. 29, n 1, pp.105-123,1995.

[Demongodin, 1994] Demongodin I. « *Les Réseaux de Petri Lots : Modélisation des Systèmes de Production à Haute Cadence en Régime Transitoire* ». Thèse de doctorat 3ème cycle (1994). Université de Montpellier II, France.

[Desrochers et al., 2003] Desroches A., Leroy A., Vallée F. « *La gestion des risques : principes et pratiques* », Hermes, 2003.

[Dilts et al., 1991] Dilts D.M., Boyd N.P. et Whorms H.H. « *The evolution of control architectures for automated manufacturing systems* ». Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, n° 1, pp. 79-93, 1991.

[Ding, 2004] Ding H., Benyoucef L., et Xie X. « *A modeling and simulation framework for supply chain network design* ». Supply Chain Optimization: product/process design facility location and flow control, Chapter16, pp. 219-232. Springer ISBN : 0-387-23566-3.

[Dioux et Dupuis, 2005] Dioux J., Dupuis M. « *La distribution : stratégie des groupes et marketing des enseignes* », Pearson Education, 527 pages, 2005.

[Dodd et Kumara, 2001] Dodd, C., Kumara, S.R.T. « *Autonomous Agents - A distributed multi-agent model for value nets* », Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2070, pp. 718 – 727, 2001.

[Dominguez et Lashkari, 2004] Dominguez H., Lashkari R.S. « *Model for integrating the supply chain of an appliance company: a value of information approach* ». International Journal of Production Research, Vol. 42, No 11, pp 2113-2140, 01 June 2004.

[Donnadieu et Karsky, 2002] Donnadieu G., Karsky M. « *La systémique, penser et agir dans la complexité* », Éditions Liaisons, 2002.

[Dormier et Fender, 2001] Dormier PP, Fender M. « *La Logistique Globale : enjeux – principes – exemples* ». Editions d'Organisation – Paris - 2001.

[Doumeingts et al., 2000] Doumeingts G., Ducq Y., Vallespir B., Kleinhans S. « *Production Management and Enterprise Modelling* »- in Computer in Industry – Elsevier – Vol. 42 – n° 2-3 - juillet 2000 – pp 245-263.

[Douraid et al., 2012] Douraid A., Lissane Elhaq S., Rachid A. et Ech-Cheikh H. «*Modeling Procurement Process in Manufacturing Industry Using UML*». 1st International IEEE Conference on Logistics Operations Management ISEL, Le Havre, October, 2012.

[Dubois et al., 1994] Dubois E., Alla H. & David R. « *Les réseaux de Petri Continus à Vitesses Fonction du Temps* ». APII, vol. 28, no. 5, pages 425–443, 1994.

[Ducq, 2007] Ducq Y. « *Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles* », Mémoire de HDR, Université Bordeaux1, 2007.

[Duffie, 1990] Duffie, N.A. « *Synthesis of heterarchical manufacturing systems* ». Computers in Industry 14 167-174, 1990.

[Duong et al., 2012] Duong P., Dahmani S., et Santoul V. « *La logistique en France : indicateurs territoriaux* ». SAMARCANDE transport-logistique-territoire. Etude prospective réalisé par un groupe interministériel piloté par la PIPAME (Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques), 2012.

[Durand, 1993] Durand, M. « *Using Functional Communication Training as an intervention for the challenging behavior of students with severe disabilities* ». In L. Kupper (Ed.), The Second National Symposium on Effective Communication for Children and Youth with Severe Disabilities: Topic papers, 89-108. McLean, VA: Interstate Research Associates, 1993.

[Ebadian et al., 2012] Ebadian M., Sowlati T., Sokhansanj S., Townley-Smith L., Stumborg M., « *Modeling and analysing storage systems in agricultural biomass supply chain for cellulosic ethanol production* ». Journal of Applied Energy, 2012.

[Edghill et Towill, 1989] Edghill J. S., and Towill D. R. « *Dynamic behaviour of fundamental manufacturing system design strategies* ». Annals of the CIRP, 38, 465–468, 1989.

[Ellram, 1991] Ellram L.M. « *Supply Chain Management: the industrial organization perspective* », International Journal of Physical Distribution and Logistics, Volume 21 (1), pp13-22, 1991.

[Elmahi et al., 2002] Elmahi I., Grunder O. and Elmoudni A. « *A Petri Net Approach for the Evaluation and Command of a Supply Chain Using the Max Plus Algebra* ». IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 2002, Hammamet, Tunisia, 2002.

[Ershler et Grabot, 2001] Ershler J., et Grabot B. « *Gestion de production : fonctions, techniques et outils* », Paris, Hermès Science Publications, 2001.

[Essaïd, 2008] ESSAID M. « *Modélisation et simulation de la connectivite des Flux logistiques dans les réseaux manufacturiers* ». Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 2008.

[Estampe, 2008] Estampe D., Michrafy M., Génin P. et Lamouri S. « *Modélisation statistique des performances stratégiques Supply chain, financières et commerciales Et leurs corrélation* » 7e Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'08 - du 31 mars au 2 avril 2008 – Paris- France.

[Ettl, 1995] Ettl M. « *Analysis and optimisation of Kanban-Controled production lines* » Thèse Friedrich Alexander University Erlangen Nuremberg Herausgeber, 1995.

[Eymerie, 1997] Eymery P. « *La logistique de l'entreprise. Supply Chain Management* », Paris, Hermès, 1997.

[Féniès et Gourgand, 2006] Féniès P., Gourgand M. « *La mesure de la performance industrielle : application à la supply chain* » dans Lièvre P., Tchernev, N. *La logistique entre management et optimisation*, Paris : Hermès, 2004, pp.210 – 221.

[Ferber,1995] Ferber J., « *Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective* ». II A. Inter Editions, 1995.

[Ferney, 2000] Ferney M. « M*odelling and controlling product manufacturing systems and State Equations. Continuous systems and discrete systems which can be reperesented by continuous models»*, Production Planning and control (Taylor and Francis, Ltd.). Vol. 11, no 1,pp. 7-19, 2000.

[Ferreira, 2010] Ferreira K., Alcântara R.L.C. et Chaves G.L.D. « *Mesures d'évaluation de la performance sur la différenciation retardée: études de cas dans les industries alimentaires* ». RIRL 2010, the 8th International Conference on Logistics and SCM Research BEM Bordeaux Management School September 29, 30 and October 1st 2010.

[Forget et al., 2008] Forget P., D'Amours S., Frayret J-M. and Gaudreault, J. « design of Multi- *behavior Agent for Supply Chains Planning: An Application to the Lumber Industry* », In : Kordic, V. (ed), Supply chain : Theory and Application, (pp.551_568), Vienna I-TECH Education and Publishing, 2008.

[Forrester, 1961] Forrester J.W. « *Industrial Dynamics* ». MIT Press: Cambridge, Massachusetts, 1961.

[Fortuin, 1988] Fortuin L. « *Performance indicators - Why, where and how?* », European Journal of Operational Research 34(1): 1-9, 1988.

[François, 2007] François J. « *Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance* », Thèse de doctorat à l'université Bordeaux1, 2007.

[Frayret *et al.,* 2001] Frayret J.M., D'amours S., Montreuil B. and Cloutier L. « *A Network Approach to Operate Agile Manufacturing Systems* », International Journal of Production Economies, vol. 74, n° 1-3, pp. 239-259, 2001.

[Frein, 1998] Frein Y. « *Evaluation de performances pour la conception de flux* ». Université d'été du pôle productique Rhôme-Alpes, 1998.

[Gabay, 1998] Gabay J. « *Merise. Vers OMT et UML. Un guide complet avec études de cas* », 3ème édition, InterEditions, 1998.

[Galasso, 2007] Galasso, F. « *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible* ». Thèse en Systèmes industriels. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse. 157 p., 2007.

[Gallois, 1990] Gallois P.M. « *Evaluation et pilotage de la performance industrielle* », dans Ecosip, Gestion Industrielle et Mesure Economique, Economica, p.275-294, 1990.

[Gamoura et Derrouiche, 2013] Gamoura S., Derrouiche R. « *Modélisation et simulation des Chaines logistiques Collaboratives : approche Orientée agents* », 10^{e} Congrès International de Génie Industriel CIGI 2013. EIGSI La Rochelle, 12-14 Juin 2013.

[Ganeshan et al., 1998] Ganeshan R., Jack E., Magazine M.J. et Stephens P. « *A taxonomicReview of Supply Chain Management Research*, in *Quantitative Models for Supply Chain Management* », Kluwer Academic Publishers, Boston, pp 841-880, 1998.

[Ganga et Carpinetti, 2011] Ganga G.M.D. and Carpinetti L.C.R. « *A fuzzy logic approach to supply chain performance management* ». Int. J. Prod. Econ., 134: 177-187, 2011.

[Génin, 2003] Génin P. « *Planification tactique robuste avec usage d'un A.P.S – Proposition d'un mode de gestion par plan de référence* ». Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.

[Gershwin, 2000] Gershwin S.B. « *Design and Operation of Manufacturing Systems – The Control Point Policy* », IIE Transactions, Vol. 32, No 2, pp.891–906, 2000.

[Ghabri, 1995] Ghabri M.-K., « *Sur la modélisation et la commande des systèmes flexibles de production* », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1995.

[Gharbi et al., 2012] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M. « *Decision-Making and Reactive Tactical Planning Approach* », 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, 23-25 May 2012.

[Giard, 2003] Giard V. « *Gestion de la Production et des Flux* », 3e édition, Economica.

[Gosselin et Ouellet, 1999] Gosselin M., Ouellet G. « *Les enquêtes sur la mise en œuvre de la comptabilité par activités : qu'avons nous vraiment appris ?* », Comptabilité - Contrôle - Audit, 5(1), pp. 45-57, 1999.

[Govil et Proth, 2002] GOVIL M. and PROTH J.M. « *Supply Chain Design and Management: Strategic and Tactical Perspectives* », London: Academic Press, 2002.

[Govindan et al., 2012] Govindan, VK , A.L, K.S.M. « *Segmentation and Classification of M-FISH Human Chromosome Images* », 09-11 August. The second International Conference on Advances in Computing and Communications (ACC-2012), Rajagiri School of Engineering & Technology, Kochi, Kerala, India, 2012. **[Graves, 1986]** Graves S.C. « *A Tactical Planning Model for a Job Shop* », *Operations Research*, vol.34, pp. 522-533, 1986.

[Graves, 1999] Graves S. C. « *A Single-Item Inventory Model for a Nonstationary Demand Process* », Manufacturing & Service Operations Management, vol. 1, pp. 50-61, 1999.

[Greis et Kasarda, 1997] Greis N.P., Kasarda J.D. « *Entreprise Logistics in the information Era* ». California Management Review, 39(3), pp 55-78, 1997.

[Guide et al., 2000] Guide Jr V.D.R. and Srivastava R. « *A review of techniques for buffering against uncertainty with MRP systems* ». Production Planning and Control, No. 11, 223-233, 2000.

[Güllü, 1996] Güllü R. « *On the Value of Information in Dynamic Production/Inventory Problems under Forecast Evolution* », Naval Research Logistics, vol. 43, pp. 289-303, 1996.

[Gunasekaran et al.,2004] Gunasekaran A., Patel C., McGaughey R.E. « *A framework for supply chain performance measurement* », Int. J. Production Economics, vol.87, pp.333–347, 2004.

[Haddad et Moreaux, 2001] Haddad S. and Moreau P. « *Les réseaux de Petri stochastiques* ». In Les réseaux de Petri - Modèles fondamentaux, chapter 9, pages 299-334. Hermès, 2001.

[Hadj-Hamou et al., 2001] Hadj-Hamou K., Aldanondo M., Lamothe J., Caillaud E. « *Aide à la conception de produits : approche assistée par la configuration* », 4ème Congrès International de Génie Industriel, Aix-Marseille, Juin 2001.

[Handfield et Nichols, 1999] Handfield, R. B and Nichols, E. L. « *Introduction to Supply Chain Management* », Prentice Hall Inc, 1999.

[Hanzalek, 2003] Hanzalek Z. « *Continuous Petri Nets and Polytopes* ». IEEE-SMC'03, Washington, USA, p. 1513-1520, 2003.

[Harland et al., 2001] Harland, C.M., Knight, L.A. and Sutton, R.Y. « *Information for supply interventions: sector, network and organization opportunities from network and organization opportunities from E-commerce* », paper presented at the 10th International Annual Conference of International Purchasing and Supply Education and Research Association, Jo¨ nko¨ ping, 8-11 April, 2001.

[Harmon, 1992] « *Reinventing the factory. The free press* ».

[Harrel et Tumay, 1994] Harrel C., Tumay K. « *Simulation made easy* ». Engineering & Management press, 1994.

[Hennequin, 2000] Hennequin S. « *Multi modèles Flou pour la commande des Systèmes de Production* ». Thèse de doctorat 3ème cycle. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, France, 2000.

[Hervani et al., 2005] Hervani, A.A., Helms, M.M.; Sarkis, J. « *Performance measurement for green supply chain management, Benchmarking: An Int* ». J., 12, 4,330-353, 2005.

[Hong-Minh et al., 2000] Hong-Minh S.M., Disney S.M., Naim M.M. « *The dynamics of emergency transhipment supply chains* ». International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, 30, pp. 788-815, 2000.

[Huan et al., 2004] Huan S.H., Sheoran S.K., Wang, G. « *A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model* ». Supply Chain Management: An International. Journal 9 (1), 23–29, 2004.

[Huang et al., 2005] Huang S.H. et al. « *Computer-assisted supply chain configuration based on supply chain operations reference (SCOR) model* ». Computers & Industrial Engineering 48 p377–394, 2005.

[Hugos, 2003] Hugos M. « *Essentials of supply chain Management* ». John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, 2003.

[Huhns, 1987] Huhns M.N., editor. « *Distributed artificial intelligence* ». Pitman. 1987.

[Iordanova, 2006] Iordanova V., « *Contribution à la modélisation et la commande du trafic routier : Approche par Bond Graph et commande par platitude* ». Thèse de doctorat en génie Informatique et automatique de l'université d'Artois, 2006.

[Jacot, 1990] Jacot J.H. « *A propos de l'évaluation économique des système intégrés de production* », ECOSIP, Economica, 19901.

[Jensen, 1992] Jensen K. « *Coloured Petri Nets. Basic concepts, analysis method and practical use* », Vol. 1 (1992). EATC monographs on Theoretical Computer Science, Springer Verlag.

[Jia et al., 2007] Jia Q., Guo W., Li B. « *Study On The Effect Of Information Sharing Strategy To Complex Supply Chain System Based On Multi-Dimension View By Simulation* ». Wireless Communications, Networking and Mobile Computing WiCom'07, Shanghai, pp. 4847-4850, Septembre, 2007.

[Jiménez Macías et Pérez de la Parte, 2004] Jiménez Macías E., and Pérez de la Parte M. « *Simulation and Optimization of Logistic and Production Systems Using Discrete and Continuous Petri Nets* ». SIMULATION, Vol. 80, Issue 3, March 2004 143-152 The Society for Modeling and Simulation International, 2004.

[Jones et Riley, 1985] Jones T., et Riley D.W. « *Using inventory for competitive advantage through supply chain management* ». International Journal of Physical Distribution and Materials Management, vol. 15, n° 5, pp. 16-26, 1985.

[Kaplan et Norton, 2001] Kaplan R.S., Norton D.P. « *Transforming the balanced scorecard from performance measurement to strategic management: Part I* ». Accounting Horizons (March): 87–104, 2001.

[Karaesmen et al., 2002] Karaesmen, F., Buzacott J.A. and Dallery Y. « *Integrating Advance Order Information in Production Control* ». IIE Transactions 34: 649-662, 2002.

[Kearney, 1994] Kearney A.T. « *Management approach to supply chain integration* », Rapport aux membres de l'équipe de recherche A.T. Kearney, Chicago, 1994.

[Kehoe et al., 2001] Kehoe D.F. et Boughton N.J., « *New paradigms in planning and control across manufacturing supply chains – the utilisation of Internet technologies* ». International Journal of Operations and Production Management, Vol. 21, No 5/6, pp 582-593, 2001.

[Khouider, 2008] Khouider S. « *Outils d'aide a la décision pour la prise de commandes imprevues* ». Thèse de doctorat, Université de Metz, 2008.

[Kim et al., 2002] Kim B.J., Leung M.Y., Park K.T., Zhang G.O. et Lee S. « *Configuring a manufacturing firm's supply network with multiple* suppliers ». IIE Transactions. Vol.34, p.663-677, 2002.

[Kim et al., 2004] Kim C.S., Tannock J., Byrne M., Farr R., Cao B. et Er M. « *State of the art review: techniques to model the supply chain in an extended enterprise* ». Operations Management Division University of Nottingham, 2004.

[Kimura et Terada, 1981] Kimura and Terada, « *Design and analysis of pull system, a method of multi stage production control* », International Journal of Production Research, Vol. 19, Pg. 241, 1981.

[Koestler, 1990] Koestler, A. « *The Ghost in the Machine* », Arkana, 1990.

[Koh et al., 2002] Koh, S.C.L., Saad, S.M. et Jones M.H. « *Uncertainty under MRP-planned manufacture: Review and,categorization* ». International Journal of Production Research, vol. 40, no. 10, pp. 2399-2421, 2002.

[König, 1997] König U.H. « *Simulation Multidimensional Supply chains- A Vensim based Model* ». Proceedings of the 15th International System Dynamics Conference, Istanbul, Turkey, August 19-22, pp. 447-450, 1997.

[Kouikoglou et Phillis, 1997] Kouikoglou V.S. and Phillis Y.A. « *A continuous-flow model for production networks with finite buffers, unreliable machines, and multiple products* », International Journal of Production Research, Vol. 35, pp.381–397, 1997.

[La Ville et Paul, 2007] La Ville J.J. et Paul J. « *Le modèle SCOR, vecteur d'excellence de la Supply Chain* », Supply Chain magazine, N°13, Mars 2007.

[Labadi, 2005] Labadi K. « *Contribution à la modélisation et à l'analyse de performances des systèmes logistiques à l'aide d'un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques* », Thèse de Doctorat, Université de Troyes, 2005.

[Labarthe et al., 2007] Labarthe O., Espinasse B., Ferrarini A., Montreuil B. « *Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context* ». Simulation Modelling Practice and Theory. 15, pp.113-136, 2007.

[Labarthe, 2006] Labarthe O. « *Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse : modèles et cadre méthodologique* ». Thèse de doctorat en cotutelle (Université Paul Cézanne et Université Laval), 30 Octobre, 2006.

[Lair et al., 1998] Lair P.O., Zerhouni N., and Ferney M., « M*odelisation des systems de production monoproduits par bond graphs* », Proceedings of the 8th international conference of managerial and technological engineering. Tecno'98, vol. sessions plénières, n 3, pp.13-20, 1998.

[Lakhal et al, 2001] Lakhal S., Martel A., Kettani O., and Oral M. « *On the Optimization of Supply Chain Networking Decisions* » European Journal of Operational Research, Vol.129, 259-270, 2001.

[Lambert et al., 2000] Lambert D.M. et Cooper M.C. « *Issues in Supply Chain Management* ». Industrial Marketing Management. Vol. 29, p. 65–83, 2000.

[Lambert et al., 2005] Lambert, D.M., Garcia-Dastugue, S.J., Croxton, K.L. « *An evaluation of process-oriented Supply Chain Management frameworks* ». Journal of Business Logistics 26 (1), 25–51, 2005.

[Laport et al., 2002] Laporte, G. Semet, F. « *Classical Heuristics for the Capacitated VRP* », The Vehicle Routing Problem, P. Toth and D. Vigo, eds., SIAM Monography on Discrete Mathematics and Applications, pp. 109-128, 2002.

[Larousse, 2002] « Dictionnaire Larousse Multidico ».

[Laux et al., 2004] Laux J.S.K., Huang G.Q., Mak K.L. « *Impact of information sharing on inventory replenishment in divergent supply chains* ». International Journal of Production Research, 42(5), pp. 919-941, 2004.

[Law et Kelton, 1991] Law, A.M. and Kelton W.D. « *Simulation modeling and analysis* ». 2nd ed. New York: McGraw- Hill, 1991.

[Le Bail et al., 1991] Le Bail J., Alla H., David R. « *Hybride Petri nets* ». Proc. of the European Control Conference, pp. 1472-1477 (1991). Grenoble, France.

[Le Bail et al., 1993] Le Bail J., Alla H. & David R. « *Asymptotic continuous Petri nets. Discrete Event dynamic Systems : Theory and Applications* », vol. 2, pages 235–263, 1993.

[Le Bail, 1988] Le Bail J. « *Simulation des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri Continus* », Rapport de DEA, LAG, INP Grenoble, Juin, 1988.

[Le Clainche, 2001] Le Clainche J.F. « *Balancing Scorecard et autres méthodes pour évaluer le score d'une entreprise* », chapitre 12, Dans Bonnefous C., Courtois A. Indicateurs de performance, Paris : Hermès, pp. 257-281, 2001.

[Le Dain et Ndao, 1997] Le Dain A.M., Ndao P.I., « *Sur un système d'indicateurs de performance pour l'évaluation d'une automatisation dans une entreprise papetière* », 2ème Congrès International Franco-québécois, Le Génie Industriel dans un monde sans frontière, 3-5 septembre 1997, Albi.

[Le Gallou, 1992] Le Gallou F., Bouchon-Meunier B. « *Systémique, Théorie et applications* », éditions Lavoisier, 1992.

[Le Moigne, 1977] Le Moigne J.L. « *La théorie du système général, Théorie de la modélisation* », Paris : Col., Systèmes-Décisions, Presses Universitaires de France, 1977.

[Le Moigne, 1994] Le Moigne J.L « *La théorie du système général : Théorie de la modélisation* », Collection Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité, 4ème Edition, 1994.

[Lee et al., 2000] Lee H. L., So K. C., Tang C. S. « *The value of information sharing in a two-level supply chain* ». Management Science, Vol. 46, No. 5, pp. 626 – 643, May 2000.

[Lee et Billington, 1993] Lee H.L., Billington C. « *Material Management in Decentralized Supply Chains* ». *Operations Research*, 41 (5), pp. 835-847, 1993.

[Lefebvre et al., 2004] Lefebvre D., Leclercq E., Druaux F. and Thomas P. « *Commande des flux dans les réseaux de Petri continus par propagation du* gradient ». CIFA'04, Douz, Tunisie, 2004.

[Lefebvre et Thomas, 2002] Lefebvre D. and Thomas P. « *Identification par phase des fréquences maximales de franchissement dans les réseaux de Pétri continus à vitesse variable* ». CIMASI'02, Casablanca, Maroc, 2002.

[Lefebvre, 2000] Lefebvre D. « *Estimation of the production frequencies for manufacturing systems* », IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, vol. 11, pp. 305 – 318, 2000.

[Li et al., 2006] Li J., Sikora R., Shaw M.J., Tan G.W. « *A strategic analysis of inter organizational information sharing* ». Decision Support Systems, 42(1), pp. 251-266, 2006.

[Liaqat, 2012] Liaqat A. « *Value-Risk based Performance Evaluation of Industrial Systems* ». Université Paris Tech, 2012.

[Lorino, 2001] Lorino P. « *La performance et ses indicateurs. Éléments de définition* ». Dans Indicateurs de performance sous la direction de Chantal Bonnefous et Alain Courtois, Productique-Hermes, Paris, 2001.

[Lozano et al., 2005] Lozano J.A., Delso E., Maroto J., Cabanellas J.M., Felez J., Vera C. «*Traffic Modelling by applying the bond graph technique*», International Conference on Bond Graph Modelling, New Orleans (Louisiana, USA), Janvier, 2005.

[Maffioli 2003] Maffioli F. « *The vehicle routing problem: A book review* ». 4OR 1(2): 149-153, 2003.

[Mahmoudi et al., 2005] Mahmoudi J., Galasso, F. et François, J., « *Cadre de classification des publications en supply Chain Management* », Rapport Interne Ecole des mines d'Albi Carmaux DR/GI-N°05.02., 42p, 2005.

[Martel et Oral, 1995] Martel, A. et Oral, M. « *Les défis de la compétitivité : visions et stratégies* », Tome II, Publi-Relais, Montréal, 1995.

[Masters et Pohlen, 1994] Masters, J.M. and Pohlen, T.L. « *Evolution of the Logistics Profession'in The Logistics Handbook (Eds. Roberson, Capcino & Howe)* », New York: Free Press, 1994.

[McFalarme et Bussman, 2000] Mcfalarme D.C. and Bussman S. « *Developments in holonic production planning and control* », International Journal of Production Planning and Control,vol. 11, n° 6, pp. 522-536, 2000.

[Mentzer et al., 2001] Mentzer J.T, Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G. « *Defining the supply chain Management* ». Journal of Business logistics, 22(2), 2001.

[Merle, 1993] Merle C., Clave F., Samenyare J. « L'optimisation du pilotage de la performance, application au secteur aéronautique », Comptabilité et Nouvelles Technologies, pp. 201-217, mai 1993.

[Miller, 2001] Miller T. « *Hierarchical operations and supply chain planning* », Springer, 2001.

[Min et Zhou, 2002] Min H. et Zhou G. « *Supply chain modeling : past, present and future* ». Computers and Industrial Engineering. Vol. 43, p.231-249, 2002.

[Molet et al., 2006] Molet H., Ballot É., Dutreuil J., et Fontane F. « *Systèmes de production et de logistique* ». Hermès Science, 2006.

[Monteiro et al., 2008] Monteiro P., Gilot D., Le Ferrec E., Rauch C., Lagadic-Gossmann D., and Fardel O. « *Dioxin-mediated up-regulation of aryl hydrocarbon receptor target genes is dependent on the calcium/calmodulin/CaMKIalpha pathway* ». Mol Pharmacol 73:769 –777, 2008.

[Montreuil et al., 2000] Montreuil B., Frayret J.-M., and D'Amours S. « *A strategic framework for networked manufacturing* », Computers in Industry, 42 (2-3), 299-317, 2000.

[Morana et Paché, 2000] Morana J. et Paché G. « *Supply chain management et tableau de bord prospectif : à la recherche de synergies* ». Logistique et Management, Vol. 8, No 1, 2000, pp 77-88.

[Mouloua et Oulamara, 2007] Mouloua Z., and Oulamara A. « *A dynamic programming approch for minimizing the transportation costs in a supply chain* », The 4th International Federation of Automatic Control Conference on Management and Control of production and Logistics, 753-758, Sibiu, Romania, 2007.

[Mouloua, 2007] Mouloua, Z.**,** « *Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques* »**.** Thèse de Doctorat, Université Nancy, 2007.

[Moyaux et al., 2007] Moyaux T., Chaib D.B., D'Amours S. « *Information Sharing as a Coordination Mechanism for Reducing the Bullwhip Effect in a Supply Chain* ». IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 37(3), pp. 396-409, 2007.

[Müller, 2003] Müller M. « *The Use of Information Technologies in Supply Chains – A Transaction Cost Analysis* », in Strategy and Organization in Supply Chains, (Eds : Seuring, Müller, Goldbach, Schneidewind), Physica-Verlag, Heidelberg New York, 2003.

[Murata et al., 1986] Murata T., Komoda N., Matsumoto K., Haruna K. « *A Petri Net Based Controller for Flexible and Maintainable Sequence Control and its Application in Factory Automation* ». IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 1, n°33, pp. 1–8, 1986.

[Nakashima et Gupta, 2003] Nakashima Knichi, Gupta Surendra M., « *Performance evaluation of a supplier management system with stochastic variability* », International Journal Manufacturing Technology and Management, 5(1/2), 2003.

[Natkin, 1980] Natkin S. « *Les Réseaux de Petri Stochastiques et leur Application à l'Evaluation des Systèmes Informatiques* ». Thèse de Docteur Ingénieur, CNAM (1980). Paris, France.

[Neely et al., 1996] Neely A.D., Mills J.F., Gregory M.J., Richards A.H., Platts K.W. and Bourne M.C.S. « *Getting the Measure of Your* Business », Findlay Publications, Horton Kirby, 1996.

[Neubert, 1997] Neubert G., « *Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas* », Thèse présentée à l'INSA de Lyon, décembre, 1997.

[Newell et al., 1957] Newell, A., Shaw C., and Simon H. « *Empirical Explorations with the Logic Theory Machine: A Case Study in Heuristics* ». In: Proc. of the 1957 Western Joint Computer Conference. McGraw-Hill, 1957.

[Oger ,1999] Oger B. « *Quelques réflexions sur les implantations d'ABCM (Activity-Based Cost Management) : les facteurs d'adoption, les bénéfices perçus* », Papier de recherche du GREGOR , n°1999-09, IAE de Paris, 1999.

[Okino, 1993] Okino N. « *Bionic manufacturing systems* ». J. Peklenik (ed.) Proceedings of the CIRP Seminar on Flexible Manufacturing Systems Past-Present-Future, Bled, Slovenia, pp. 73–95, 1993.

[Orlicky, 1975] Orlicky J. « *Material Requirements Planning : The New Way of Life in Production and Inventory Management* ». McGraw-Hill, New York, 1975.

[Osman et Laporte, 1996] Osman I. et Laporte G. « *Metaheuristics : A bibliography* ». Annals of Operations Research, 63(5):511–623, 1996.

[Ounnar, 1999] Ounnar F. « *Prise en compte des aspects décision dans la modélisation par réseaux de Petri des systèmes flexibles de production* », Thèse d'état, INP de Grenoble, 1999.

[Ouzizi, 2005] Ouzizi L. « *Planification de la production par co-décision et négociation de l'entreprise virtuelle* », Thèse de doctorat, Université de Metz, 2005.

[Pérès et al., 2007] Pérès F., Verron S., Dejean J.P. et Averbuch D. « *Formalisation d'une approche structurée de modélisation d'un système industriel complexe par réseaux de Petri : application aux systèmes de production pétroliers offshore ultra grands fondsoil & Gas* », Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 375-389.

[Petri, 1962] Petri C.A. « *Kommumkation mit Automates* ». Thèse de doctorat, Université de Bonn, Allemagne, 1962.

[Petrovic, 2001] Petrovic D. « *Simulation of supply chain behaviour and performance in an uncertain environment* ». International Journal of Production Economics, n°71, pp. 429-438, 2001.

[Pierreval et al., 2007] Pierreval H., Bruniaux R. and Caux C., « *A continuous simulation approach for supply chains in the automotive industry* », Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 15, N° 2, pp. 185–198, 2007.

[Pierreval, 2006] Pierreval H., « *Simulation combinée discret/continu : étude du cas d'une fonderie* », 6ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation – MOSIM'06, Rabat, Maroc, 2006.

[Proth et al., 1994] Proth J.M., Xie X. « *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production* ». Masson, Paris, 1994 - ISBN 2-225-84649-9.

[Rascle et al., 2005] Rascle, O., Coulomb, G., Delsarte, A. « *Perceived motivational climate and aggression as a function of competitive level in youth male French handball* ». Journal of Sport Behavior, vol. 28, n° 1, 51-67, 2005.

[Rault, 1993] Rault A. « *Systèmes de production manufacturiers-Bases de données intelligentes* ». In Base de données et données de base, collection Fredrik R. Bull, 12, Masson, pp. 53-62, 1993.

[Recalde et Silva, 2001] Recalde L. et Silva M. « *PN fluidification revisited Semantics and steady state* », APII-JESA, 35(4):435-449, 2001.

[Riddalls et al., 2002] Riddalls C.E. et Bennett S. « *Production-inventory system controller design and supply chain dynamics* ». International Journal of Systems Science. Vol.33, p. 181-195, 2002.

[Riopel et al., 2011] Riopel, M., Sakr, F., Raîche, G., Potvin, P. & Djédjé, V. « *Variables de prédiction du niveau de difficulté de tâches d'évaluation comportant des équations du premier degré au secondaire* ». Dans G. Raîche, K. Paquette-Côté & D. Magis (dir.), Des mécanismes pour assurer la validité de l'interprétation de la mesure en éducation. volume 1 : la mesure. (pp. 51-83). Québec : Presses de l'Université du Québec, 2011.

[Robinson, 2005] Robinson S. « *Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next?* » Journal of the Operational Research Society. Vol.56, p. 619–629, 2005.

[Ross et Schomann, 1977] Ross D. T., & Schoman Jr. K.E. « *Structured analysis for requirements definition* ». Software Engineering, IEEE Transactions on, (1), 6-15, 1977.

[Rossetti et Chan, 2003] Rossetti M.D.et Chan H.T. « *A Prototype Object-Oriented supply chain simulation framework* ». Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, Eds, 2003.

[Rota-Franz et al., 2001] Rotta-Franz K., Thierry C., Bel G. « *Gestion des Flux dans les chaînes logistiques*», dans Burlat., JP Campagne : Performances industrielles et gestion des flux, Paris : Hermès, 2001, pp. 153-186.

[Ruiz Usano et al., 1996] Ruiz Usano R., Framinan Torres J.M. Crespo Marquez A.,Zubiria De Castro R. « *System Dynamics and Discrete Simulation in a Constant Work In Process System. A Comparative Study* », Proceedings of the conference System Dynamics' 96, Cambridge, Massachussets, July 21-25, pp.457-460, 1996.

[Ruiz Usano et al., 1997] Ruiz Usano R., Crespo Marquez A. and Framinan Torres J.M. « *Modeling manufacturing systems. A simulation study* ». Proceedings of the 15th International System Dynamics Conference, Instanbul (Turkey), pp. 671-674, 1997.

[Savy, 2007] Savy M. «*Le transport de marchandises* ». Edition Groupe Eyrolles, Paris, 2007.

[SCC, 2000] Supply Chain Council, http://www.supply-chain.org.

[Seuring, 2002] Seuring S., 2002, « *Supply Chain costing – A conceptual framework* », in Cost Management in Supply Chains, Seuring S., et Goldbach M., editors, Springer Physica –Verlag, pp.15-30.

[Shapiro, 1998] Shapiro J. « *Bottom-up versus top-down approaches to supply chain modelling in Quantitative Models for Supply Chain Management* ». Kluwer Academic Publishers, p.739-759, 1998.

[Shib, 2013] Shib S.S. « *Optimal contract strategies for two stage supply chain* », Journal of Economic Modelling 30, 253–260, 2013.

[Silva et Recalde, 2002] Silva M., & Recalde L. « *Petri nets and integrality relaxations: a view of continuous Petri nets* ». IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 32(4), 314–327, 2002.

[Silva et Recalde, 2003] Silva, M. and Recalde L. « *On Fluidification of Petri Nets: from Discrete to Hybrid and Continuous models* ». IFAC-ADHS'03, Saint Malo, France, p. 9-20, 2003.

[Silva et Teruel, 1997] Silva, M., and E. Teruel. 1997. Petri nets for the design and operation of manufacturing systems. *European Journal of Control* 3 (3): 182-99.

[Simchi-Levi et al., 2000] Simchi-Levi D, Kaminsky P, Simchi-Levi E. « *Designing and Managing the Supply Chain : concepts, strategies, and case studies* ». Irwin McGraw-Hill, USA 2000.

[Smata et al., 2010] Smata N., Tolba C., Boudebous D., Boukachour J., « *From car transport to supply chain: Modeling and performance evaluation*"", International symposium on environment friendly energies in electrical applications, EFEEA'10, Ghardaïa, Algeria, November 2- 4, 2010.

[Smata et al., 2011a] Smata N., Tolba C., Boudebous D., Boukachour J. « *From car transport to supply chain: Modeling and performance evaluation* », The Mediterranean Journal of Measurement and Control "MJMC". Volume 7, No. 4, October 2011. ISSN: 1743-9310. (http://www.medjmc.com/papers%20archive/index.html).

[Smata et al., 2011b] Smata N., Boudebous D., Boukachour J. « *Modélisation de la chaîne logistique en utilisant les réseaux de Petri continus* », 9e Congrès International de Génie Industriel CIGI 2011, 12-14 octobre 2011, Saint-Sauveur, Québec, CANADA, 2011. (https://symposia.cirrelt.ca/CIGI2011/fr/schedule?slot_id=341).

[Smata et al., 2011c] Smata N., Boudebous D., Boukachour J., Tolba C. « *Production, supply, and traffic systems: a unified modeling using Petri Nets* », 4th IEEE International Conference on Logistics "LOGISTIQUA 2011", May 31, 2011 – June 3, 2011 Hammamet, Tunisia. ISBN: 978-1-4577-0322-5, pp. 405 – 411. (http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5939434).

[Smata et al., 2012] Smata N., Tolba C., Boudebous D., Boukachour J. « *Dynamic modeling of the supply chain and capacity planning in make-to-stock and assemble-to-order strategies* », The 1St IEEE International Conference on Logistics Operations Management. 2012, 17-19 octobre, Le Havre, France.

[Smata, 2011] Smata N. « *La modélisation de la chaîne logistique en utilisant les réseaux de Petri Continus* », Programme d'ETudes et de REcherches en Logistique, PETREL'11, 6ième journées des doctorants en logistique, 26 mai 2011-ISEL, Université du Havre.

[Souilah, 2008] Souilah S. « Réengineering du pilotage des flux dans une Relation client/fournisseur Application au cas de l'industrie automobile », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Paris, 2008.

[Srinivasa et Viswanadham, 2001] Srinivasa Raghavan N.R, and Viswanadham N. « *Generalized queueing network analysis of integrated supply chains* », International Journal of Production Research Society, 39(2), pp. 205-224, 2001.

[Stadler et Kilger, 2001] Stadler H., Kilger C. « *SCM, An overwiew in Supply Chain Management and Advanced Planning* », Springer, 2001.

[Stadtler, 2005] Stadler H. « *Supply chain management and advanced planning—basics* », overview and challenges, European Journal of Operational Research, Volume 163, Issue 3, pp 575-588, 2005.

[Stalk et al., 1990] Stalk G., Hout T.M., « *Competing againt Time: How Time-based Competition is Reshaping Global Markets* », The Free Press, New York, USA, 1990.

[Stevens, 1989] Stevens G.C. « *Integrating the Supply Chain* ». International Journal of Physical Distribution & Materials Management, 19, pp. 3-8, 1989.

[Sugimori *et al.*, 1977] Sugimori Y., Kusunoki F., Cho F. and Uchikawa S. « *Toyota production system and kanban system : Materialization of just-in-time and respect-for-human system* », International Journal of Production Research, vol. 15, pp. 553-564, 1977.

[Supply Chain Council, 2006] « *Supply Chain Operation Reference Model* », www.SupplyChain.org**.**

[Suri and Fu, 1994] Suri R., and Fu B.R. « *On using continuous flow model lines to model discrete production lines* », Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, Vol. 4, pp. 127–169, 1994.

[Swaminathan et al., 1998] Swaminathan J.M., Smith S.F., Sadeh N.M. « *Modeling supply chain dynamics: A multi-agent approach* ». Decision Sciences, 29(3), pp. 607-632. , 1998.

[Sweetser, 1999] Sweetser A. « *A Comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES)* », Proceedings of the 17th International Conference of the System Dynamics Society, 20-23 July, Wellington, New Zealand, 1999.

[Tahir et Darton, 2010] Tahir, A.C. et Darton, R.C. « *The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation* ». Journal of CleanerProduction, 18(16-17), 1598-1607, 2010.

[Tahon & Frein, 2000] Tahon C., Frein Y. « *Document de synthèse du groupe de recherche en productique* » – thème 4 : Evaluation de Performances, 2000.

[Tamani et al., 2008] Tamani K., Boukezzoula R., Habchi G. « *Approche de pilotage par allocation de capacité utilisant un modèle de simulation à flux continu* », 7ème conférence de Modélisation et SIMulation – MOSIM, Paris, France, 31 Mars au 2 Avril 2008.

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

[Tardieu et al., 1989] Tardieu H., Rochfeld A., Coletti R. « *La méthode Merise : Principes et outils* » - Tome 1, Les Editions d'Organisation, 1989.

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

[Tchernev, 1997] Tchernev N. « *La modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production* ». Thèse de Doctorat en informatique, Université Clermont-Ferrand, 1997.

[Terzi et Cavalieri, 2004] Terzi S. and Cavalieri S. « *Simulation in the supply chain context: a survey* ». Computers in Industry, 53, 3-16, 2004.

[Tharumarajah, 2003] Tharumarajah A. « *A self-organsing view of manufacturing enterprises* », Computer in Industry 51: 185-196, 2003.

[Thiel, 1998] Thiel D. « *Mise en évidence de l'instabilité des modèles de réapprovisionnement continu par une analyse dynamique des systèmes logistiques* ». Economie rurale, n°245-246, mai/août, pp. 56-68, 1998.

[Thierry et al., 2008] Thierr, C., Thomas A. & Bel G. « *Simulation for Supply Chain Management* », 382 p. ISTE Ltd (London, UK) and John Wiley & Sons, Inc. (Hoboken, NY, USA) , 2008.

[Thomas et Griffin, 1996] Thomas D. & Griffin P. « *Coordinated supply chain management* », European Journal of Operational Research, 94, 1-15, 1996.

[Tian et Huang, 2007] Tian Y., Huang D. « *The Impact of Downstream Information Sharing on Upstream Supply Chain with Fuzzy Demand* ». Mechatronics and Automation ICMA'07, Harbin, pp. 2241-2246, Août, 2007.

[Toktay et Wein, 2001] Toktay L.B. and Wein M. « *Analysis of a Forecasting-Production-Inventory System with Stationary Demand* », Management Science, vol. 47, pp. 1268-1281, 2001.

[Tolba et al., 2005] Tolba C., Lefebvre D., Thomas P. & ElMoudni A. « *Continuous and timed Petri nets for macroscopic and microscopic traffic flow modeling* ». International Journal Simulation Modelling Practice and Theory, 3(5), 407-436, 2005.

[Trentesaux, 2002] Trentesaux D. « *Pilotage hétérarchique des systèmes de production* », Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, 2002.

[Tsung, 2000] Tsung F. « I*mpact of information sharing on statistical quality control* ». IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, 30, pp. 211-216, 2000.

[Vachon et Klassen, 2008] Vachon S, Klassen RD. « *Environmental management and manufacturing performance: The role of collaboration in the supply chain* ». Int. J. Prod. Econ. 111:299-315, 2008.

[Van Brussel et al., 1998] Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P. « *Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA* », Computers in Industry, 37, pp. 255-274, 1998.

[Van der Vost, 2000] Van der Vorst, Jack G.A.J., Beulens J.M, Van Beek P. « *Modelling and simulating Multi-echelon Food Systems* », European Journal of Operational Research, 122, pp. 354-366, 2000.

[Van Leeuwen et Norrie, 1997] Van Leeuwen E.H. and Norrie D.H. « *Intelligent manufacturing: holons and holarchies* ». Manufacturing Engineer, **76**(2), 86-88, 1997.

[Venkatadri et al, 1997] Venkatadri U., Rardin R.L. and Montreuil B. « *A design methodology for fractal layout organization* ». IIE Transactions, 29, pp. 911-924, 1997.

[Verdouw et al., 2010] Verdouw C.N. et al. « *Process modelling in demand-driven supply chains : A reference model for the fruit industry* ». Computers and Electronics in Agriculture 73 p174–187, 2010.

[Vernadat, 1996] Vernadat F. « *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Application* », Chapman & Hall, Londres, 1996.

[Vernadat, 1999] Vernadat F. « *Technique de Modélisation en Entreprise : Application aux Processus Opérationnels* », Economica, Paris, 1999.

[Villeminot, 2004] Villeminot A. « *Modélisation et simulation de la logistique d'approvisionnement dans l'industrie automobile : Application pour un grand constructeur* », Thèse de doctorat, Université H. Poincaré, Nancy, 10 Décembre 2004.

[Viswanadham et Srinivasa, 2000] Viswanadham N., Srinivasa Raghavan N.R., « *Performance Analysis and Design of Supply Chains: A Petri Net Approach* », Journal of the Operational Research Society, 51(10), pp. 1158-1169. 2000.

[Viswanathan et Piplani, 2001] Viswanathan S., and Piplani R. « *Supplier Buyer Inventory Systems with Supplier Owned Inventory* » presented at INFORMS Annual Conference, Miami Beach, 2001.

[Vollmann et al., 1992] Vollmann T., Berry W. and Whybark D. « *Manufacturing Planning and Control Systems* », Irwin, USA, 1992.

[Ward et al., 1985] Ward P.T., et Mellor S.J. « *Structured development for real-time system* », vol.1, 2 et 3 Yourdon Press, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

[Warnecke, 1993] Warnecke, H. « *The Fractal Company: A Revolution in Corporate Culture* », Springer, Berlin, 1993.

[Weng, 1999] Weng Z.K. « *Concurrence, postponement and trans-shipment in a two-echelon manufacturing and distribution system* ». International Journal of Production Research, 37, pp. 341-357, 1999.

[Wu et Cheng, 2008] Wu Y.N., Cheng T.C.E. « *The impact of information sharing in a multiple-echelon supply chain* ». International Journal of Production Economics, 115(1), pp. 1-11, 2008.

[Wyland et al., 2000] Wyland B., Buxton K. et Fuqua B. « *Simulating the Supply Chain* ». IEE Solutions, p. 37-42, 2000.

[Xiaoni, 2006] Xiaoni, D. « An improved neural networks prediction model and its application in Supply Chain », **4** (**3**), pp. 23-27, 2006.

[Yuan et al., 2002] Yuan Y., Liang T.P et Zhang J.J. « *Using agent technology to support supply chain management : potentials and challenges* ». Mc Master University, 2002.

[Zaojie et Guoying, 2007] Zaojie K., Guoying H. « *The Effect of Information Sharing on Inventory in A Two-stage Supply Chain* ». Automation and Logistics ICAL'07, Jinan, pp. 2883-2886, Août, 2007.

[Zerhouni, 1991] Zerhouni N., Alla H. « *Sur l'analyse des lignes de fabrication par réseaux de Petri Continus* », RAIRO-APII, Vol. 26, pp. 253-276, 1992.

[Zhao et Qiu, 2007] Zhao X., Qiu M. « *Information Sharing in a Multi- Echelon Inventory System* ». Tsinghua Science & Technology, 12(4), pp. 466-474, 2007.

[Zhao et Xie, 2002] Zhao X., Xie J. « *Forecasting errors and the value of information sharing in a supply chain* ». *International Journal of Production Research*, 40(2), pp. 311-335, 2002.

[Zheng et Federgruen, 1991] Zheng Y.S. et Federgruen A. « *Finding optimal (s, S) policies is about as simple as evaluating a single policy* ». Operations Research, vol. 39, no. 4, pp. 654-664, 1991.

[Zhou et al., 2008] Zhou K., Ferreira J.A,. de Haan S.W.H. « *Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems* ». International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 477-489, 2008.

[Zhu et al., 2007] Zhu, Q., Sarkis, J., Lai, K. « *Green supply chain management: pressures, practices and performance within the Chinese automobile industry* ». Journal of Cleaner Production, 15(11-12), pp. 1041-1052, 2007.

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

Titre de la thèse:

Contribution à la modélisation et à l'analyse de la chaîne logistique en utilisant les réseaux de Petri.

Résumé :

La modélisation de la chaîne logistique "CL", proposée dans cette contribution, adopte une vision globale et tendancielle du fonctionnement de la chaîne. Vu la complexité et la grande diversité de la CL, la modélisation s'appuie sur une démarche modulaire et générique fondée sur le potentiel des Réseaux de Petri Continus à Vitesse variable (RdPCV) tout en introduisant des concepts issus de l'approche systémique. Notre modèle permet d'intégrer à la fois l'aspect physique, informationnel et décisionnel de la CL et s'adapte à la grande diversité de sa configuration. De plus, il permet, à travers sa description continue du phénomène de transfert des flux de la CL, de pallier les problèmes d'explosion combinatoire inhérents à la taille importante de la chaîne. Contrairement aux modèles de la CL existants, notre modèle offre une lisibilité en termes d'analyse des interactions entre les différents acteurs de la chaîne, et donne une vision globale plus claire de l'état de cette chaîne facilitant ainsi son analyse, l'évaluation de sa performance et le pilotage de ses différents flux.

Mots clés : *Chaîne logistique, Modélisation, Simulation, Evaluation de la performance, Aide à la décision, Réseaux de Petri Continus à vitesse Variable (RdPCV).*

Title of the thesis :

Contribution to modeling and analysis of supply chain using Petri nets.

Abstract :

The proposed model for supply chain in this contribution adopts a global and trend vision of supply chain functioning. Given the complexity and diversity of the supply chain, the modeling follows a modular and generic approach based on the potential of variable speed continuous Petri nets (VCPNs) and the concepts of the systemic approach. Our model allows to integrate both physical, informational and decision-making aspect of the supply chain and it adapts to the great diversity of its configuration. Moreover, through its continuous description of the flow transfer phenomena within the chain, it overcomes the problems of combinatorial explosion related to the large size of the chain. Unlike existing supply chain models, our model provides clarity in terms of interactions analysis between the different actors in the chain, and gives a clearer global vision of the state of this chain thus facilitating its analysis, evaluation of its performance and management of its various flows.

Keywords : *Supply chain, Modeling, Simulation, Performance evaluation, Decision-Making, Variable speed Continuous Petri Nets (VCPNs).*