



**HAL**  
open science

# Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance

Julien Francois

► **To cite this version:**

Julien Francois. Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2007. Français. NNT: . tel-00267825v1

**HAL Id: tel-00267825**

**<https://theses.hal.science/tel-00267825v1>**

Submitted on 28 Mar 2008 (v1), last revised 17 Sep 2008 (v2)

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

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

N° d'ordre : 3521

# THESE

PRESENTEE A

## L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES  
ET DE L'INGENIEUR

**Par M. Julien FRANCOIS**

Ingénieur ENSEEIHT

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPECIALITE : PRODUCTIQUE

\*\*\*\*\*

Planification des chaînes logistiques :  
Modélisation du système décisionnel et performance

\*\*\*\*\*

Soutenue le 17 décembre 2007

**Après avis de MM. :**

|               |  |            |
|---------------|--|------------|
| Yannick FREIN | Professeur, ENSGI INPG, Grenoble             | Rapporteur |
| André THOMAS  | Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy | Rapporteur |

**Devant la commission d'examen formée de MM. :**

|                           |  |              |
|---------------------------|--|--------------|
| Jean-Paul BOURRIERES      | Professeur, Université Bordeaux 1            | Directeur    |
| Jean-Christophe DESCHAMPS | Maître de conférences, Université Bordeaux 1 | Co-directeur |
| Gérard FONTAN             | Professeur, ENSEEIHT, Toulouse               | Co-directeur |
| Yannick FREIN             | Professeur, ENSGI INPG, Grenoble             | Rapporteur   |
| André THOMAS              | Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy | Rapporteur   |
| Bernard GRABOT            | Professeur, ENIT, Tarbes                     | Président    |
| Bruno VALLESPER           | Professeur, Université Bordeaux 1            | Examinateur  |

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système – Département Automatique, Productique et Signal,  
UMR 5218 CNRS

351 cours de la Libération 33405 TALENCE cedex FRANCE



---

# Remerciements

---



---

# Avant-propos

---

Ces travaux de recherche ont été développés dans le cadre d'une thèse co-encadrée par le LAPS-IMS de Bordeaux et plus particulièrement l'équipe ADC (Aide à la Décision et Conduite des Systèmes de Production) du groupe Productique d'une part, et le LAAS de Toulouse, groupe MOGISA (Modélisation, Optimisation et Gestion Intégrée de Systèmes d'Activités) d'autre part.

La thèse a débuté dans le cadre de l'EPML (Equipe Projet Multi-Laboratoires) PICHALOG (Pilotage Intégré de CHAîne LOGistique) du CNRS. Cette EPML faisait intervenir quatre laboratoires : le CERTOP (Centre d'Etude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir) de Toulouse, le LAAS, le LAPS et le LGP (Laboratoire Génie de Production) de Tarbes.

Cette thèse a également bénéficié de la dynamique du groupe SCMIP (Supply Chain Midi-Pyrénées), groupe d'échanges en gestion de chaîne logistique dans le Sud-Ouest, auquel participent le CGI de l'EMAC, le LAAS, le LAPS-IMS, le LGP et l'ONERA. Le travail collectif s'est notamment porté, avec d'autres doctorants (François GALASSO, Jaouher MAHMOUDI), sur la bibliographie du domaine « Supply Chain Management ».



---

# Sommaire

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>Chapitre 1 : Contexte, problématique et positionnement du travail de recherche.....</b>            | <b>16</b> |
| 1.1 Facteurs de complexité de la fonction « Production » au sein d'une entreprise manufacturière..... | 16        |
| 1.1.1 Le secteur d'activités et les produits .....  | 16        |
| 1.1.2 Le volume de production.....  | 17        |
| 1.1.3 Le mode de production.....  | 17        |
| 1.2 Organisation de la gestion de production .....  | 18        |
| 1.2.1 La prise de décisions dans une entreprise : un système hiérarchisé.....                         | 19        |
| 1.2.1.1 Niveau stratégique.....   | 19        |
| 1.2.1.2 Niveau tactique.....  | 19        |
| 1.2.1.3 Niveau opérationnel .....   | 19        |
| 1.2.2 Quelques approches classiques de planification .....  | 20        |
| 1.2.2.1 L'approche MRP 2 .....  | 20        |
| 1.2.2.2 La méthode Kanban .....   | 21        |
| 1.2.3 Les processus, supports à la mise en réseaux des entreprises et leur intégration.....           | 22        |
| 1.2.3.1 Le processus Approvisionnement .....  | 23        |
| 1.2.3.2 Le processus Production.....  | 24        |
| 1.2.3.3 Le processus Distribution.....  | 24        |
| 1.2.3.4 Le processus Vente.....   | 24        |
| 1.2.3.5 Interactions entre les processus et autres « services ».....                                  | 24        |
| 1.3 Définition de la chaîne logistique.....   | 25        |
| 1.3.1 Emergence historique de la chaîne logistique .....  | 25        |
| 1.3.2 Définitions issues de la littérature scientifique .....   | 27        |
| 1.3.2.1 La logistique .....   | 27        |
| 1.3.2.2 La chaîne logistique (Supply Chain - SC).....   | 28        |
| 1.3.3 Structure physique de la chaîne.....  | 29        |
| 1.4 Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management - SCM) .....                             | 31        |
| 1.4.1 Définition .....  | 31        |
| 1.4.2 Les trois flux de la chaîne logistique.....   | 33        |
| 1.4.2.1 Le flux d'information .....   | 33        |
| 1.4.2.2 Le flux physique.....   | 33        |
| 1.4.2.3 Le flux financier .....   | 33        |



|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 1.4.3   | Le système décisionnel.....   | 34        |
| 1.4.4   | Les performances .....  | 35        |
| 1.4.4.1   | Comment améliorer la performance?.....  | 35        |
| 1.4.4.2   | Principaux indicateurs du SCM.....  | 39        |
| 1.4.5   | Modélisation de la gestion de la chaîne logistique.....                           | 41        |
| 1.4.5.1   | Modélisation d'entreprise.....  | 41        |
| 1.4.5.2   | Les modèles analytiques.....  | 42        |
| 1.4.5.3   | Les modèles de simulation .....   | 42        |
| 1.4.5.4   | L'offre logicielle .....  | 43        |
| 1.5   | La littérature scientifique de la gestion de la chaîne logistique .....           | 44        |
| 1.5.1   | L'abondance des publications .....  | 44        |
| 1.5.2   | Classement de la littérature .....  | 45        |
| 1.6   | Synthèse bibliographique et objectifs de la thèse.....                            | 48        |
| <b>Chapitre 2 : Modélisation de l'architecture de pilotage des chaînes logistiques.....</b> |   | <b>56</b> |
| 2.1   | Introduction .....  | 56        |
| 2.1.1   | Approche systémique .....   | 57        |
| 2.1.2   | Hiérarchisation .....   | 57        |
| 2.2   | Pilotage des réseaux d'entreprises : concepts fondamentaux et structuration ..... | 58        |
| 2.2.1   | Définitions du pilotage et des centres de décision .....                          | 58        |
| 2.2.2   | Typologie des informations, supports à la décision .....                          | 60        |
| 2.2.2.1   | Les informations endogènes et les informations exogènes .....                     | 60        |
| 2.2.2.2   | La nature des informations .....  | 61        |
| 2.2.2.3   | La variabilité des informations.....  | 62        |
| 2.2.3   | La temporalité dans le pilotage : la planification à horizon glissant.....        | 62        |
| 2.2.3.1   | Horizon et période de planification.....  | 62        |
| 2.2.3.2   | Réactivité des réseaux logistiques.....   | 63        |
| 2.3   | Modélisation de l'architecture de pilotage des réseaux d'entreprises.....         | 65        |
| 2.3.1   | Concept et notations .....  | 65        |
| 2.3.2   | Architecture de pilotage multi-niveaux.....                                       | 66        |
| 2.3.3   | Généralisation à un réseau d'entreprises.....                                     | 67        |
| 2.4   | Les types d'architecture de pilotage.....   | 69        |
| 2.4.1   | Le pilotage distribué : une approche pragmatique .....                            | 70        |
| 2.4.2   | Le pilotage centralisé : une approche idéale .....                                | 72        |
| 2.4.3   | Le pilotage mixte : une approche consensuelle.....                                | 74        |
| 2.4.4   | Comparaison rapide des trois types d'architecture de pilotage.....                | 76        |
| 2.5   | Conclusion du chapitre.....   | 76        |

|   |                |
|---|----------------|
| <b>Chapitre 3 : Modèle générique de planification pour un centre de décision .....</b>        | <b>80</b>      |
| 3.1 Introduction .....  | 80             |
| 3.2 Etat de l'art sur la simulation des processus de pilotage de chaînes logistiques.....     | 80             |
| 3.3 Environnement et paramétrage du problème de planification vu d'un centre de décision..... | 83             |
| 3.3.1 Modélisation de l'environnement d'un centre de décision .....                           | 83             |
| 3.3.1.1 Les ensembles pour définir l'environnement d'un centre de décision.....               | 84             |
| 3.3.1.2 Les indices utilisés dans le modèle .....   | 85             |
| 3.3.1.3 Exemple de notation.....  | 85             |
| 3.3.2 Les paramètres et variables de décision du modèle de planification .....                | 86             |
| 3.3.2.1 Notations utilisées .....   | 86             |
| 3.3.2.2 Les paramètres du modèle.....   | 87             |
| 3.3.2.3 Les variables du modèle.....  | 88             |
| 3.3.2.4 Flux d'information envers les autres entités du réseau logistique .....               | 88             |
| 3.4 Le modèle analytique du problème de planification .....                                   | 90             |
| 3.4.1 Les contraintes du modèle.....  | 90             |
| 3.4.2 Le critère du modèle.....   | 93             |
| 3.4.3 Principe de fonctionnement du modèle de planification.....                              | 94             |
| 3.5 Les relations inter-centres de décision .....   | 95             |
| 3.5.1 Relations horizontales : échange de type client - fournisseur .....                     | 95             |
| 3.5.1.1 Processus de commande à un fournisseur : prise en compte du délai d'information.....  | 96             |
| 3.5.1.2 Informations concernant les futures livraisons au client.....                         | 97             |
| 3.5.2 Relations verticales : échange entre centres de décision de niveaux successifs ..       | 98             |
| 3.5.2.1 Ordres pour les ressources internes d'un centre de décision.....                      | 98             |
| 3.5.2.2 Retours d'information vers un centre de décision de niveau supérieur .....            | 100            |
| 3.6 Conclusion du chapitre.....   | 100            |
| <br><b>Chapitre 4 : Analyse de performances - robustesse et réactivité du pilotage.....</b>   | <br><b>106</b> |
| 4.1 Introduction .....  | 106            |
| 4.2 Objectifs de l'analyse .....  | 106            |
| 4.2.1 Mesure de la performance de la chaîne .....   | 106            |
| 4.2.2 Approche comparative des différentes architectures de pilotage.....                     | 107            |
| 4.3 Présentation du cas d'étude .....   | 108            |
| 4.3.1 Définition du cas-type : entretiens industriels préalables.....                         | 108            |
| 4.3.2 Description de la structure physique et des données techniques.....                     | 110            |
| 4.3.3 Les problématiques considérées.....   | 114            |
| 4.4 Objectifs et protocoles d'expérimentation .....   | 114            |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 4.4.1  | Définition des architectures de pilotage appliquées au cas-type.....   | 115        |
| 4.4.2  | Données initiales .....  | 117        |
| 4.4.3  | Présentation de l'outil de simulation.....                             | 117        |
| 4.5  | Etude de la robustesse .....   | 119        |
| 4.5.1  | Scénarios d'expérimentation .....                                      | 119        |
| 4.5.2  | Résultats des campagnes expérimentales .....                           | 121        |
| 4.5.3  | Analyse des résultats .....  | 123        |
| 4.5.4  | Conclusion sur l'étude de la robustesse .....                          | 128        |
| 4.6  | Etude de la réactivité .....   | 129        |
| 4.6.1  | Scénarios d'expérimentation .....                                      | 129        |
| 4.6.2  | Les résultats de l'analyse de réactivité.....                          | 132        |
| 4.6.3  | Analyse des résultats .....  | 135        |
| 4.6.4  | Conclusions sur l'étude de la réactivité.....                          | 141        |
| 4.7  | Conclusion du chapitre.....  | 142        |
| <b>Chapitre 5 : Analyse du couplage de plusieurs réseaux logistiques .....</b> |  | <b>144</b> |
| 5.1  | Introduction .....   | 144        |
| 5.2  | Le problème d'allocation des capacités d'un maillon commun.....        | 145        |
| 5.2.1  | Positionnement du problème .....                                       | 145        |
| 5.2.2  | Définition du processus de négociation .....                           | 146        |
| 5.2.3  | Incidences sur le modèle de planification .....                        | 147        |
| 5.3  | Cadre de l'expérimentation .....                                       | 149        |
| 5.3.1  | Facteurs reflétant la stratégie de négociation .....                   | 149        |
| 5.3.2  | Campagne d'expérimentations .....                                      | 152        |
| 5.3.3  | Mesure de la performance .....   | 153        |
| 5.4  | Analyse des résultats d'expérimentations .....                         | 157        |
| 5.4.1  | Influence de la répartition initiale de la capacité.....               | 157        |
| 5.4.2  | Influence de la sur-réservation / sous-réservation de la capacité..... | 159        |
| 5.4.3  | Respect des plans de production .....                                  | 162        |
| 5.4.4  | Respect des plans d'approvisionnement .....                            | 163        |
| 5.5  | Amélioration de la convergence du processus de négociation.....        | 165        |
| 5.5.1  | Définition de nouvelles stratégies facilitant la convergence.....      | 165        |
| 5.5.2  | Expérimentations des stratégies .....                                  | 166        |
| 5.6  | Conclusion du chapitre.....  | 168        |
| <b>Conclusion générale et perspectives .....</b>                               |  | <b>170</b> |
| <b>Bibliographie.....</b>  |  | <b>178</b> |
| <b>Annexe .....</b>  |  | <b>188</b> |

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'émergence des réseaux d'entreprises à partir des années 90 concrétise les alliances stratégiques que les entreprises sont amenées à établir, face à la volatilité des marchés, pour partager les risques financiers et rechercher des complémentarités industrielles.

L'ensemble des entreprises partenaires forme un réseau ou « chaîne logistique » dédié(e) à la production d'une famille de produits finis pour les entreprises clientes (cf. figure 1).

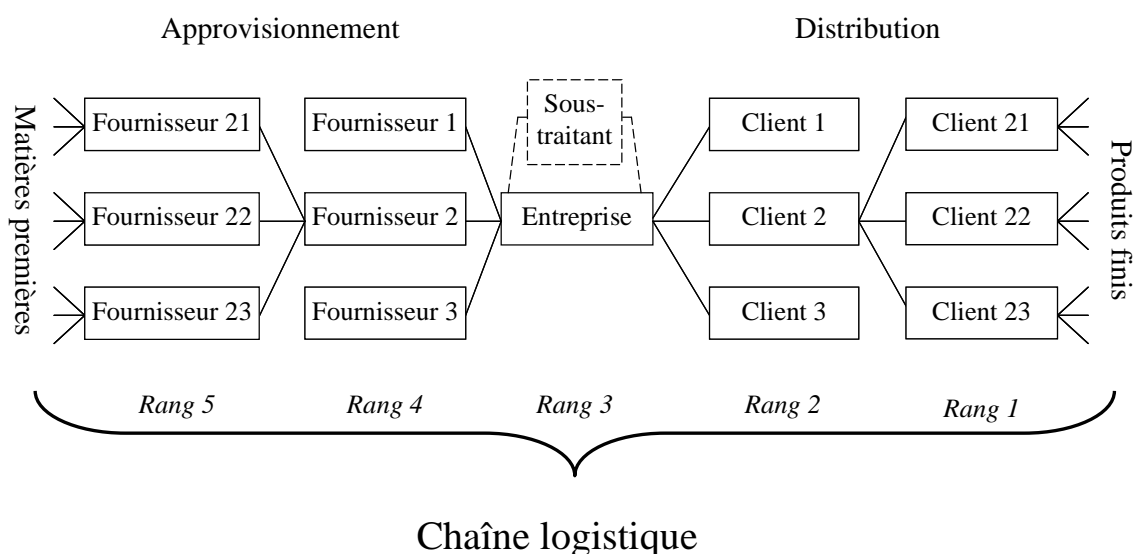


Figure 1 : Exemple de chaîne logistique

Ainsi une chaîne logistique peut-elle se définir comme la coopération de tous les partenaires industriels pour l'élaboration d'une famille de produits finis.

Ces travaux de thèse abordent la planification tactique des activités de production, par l'analyse d'un cas-type<sup>1</sup> représentatif, au facteur d'échelle près, d'une large classe de chaînes logistiques. Nous cherchons à comparer les performances que procurent différentes architectures de pilotage de chaîne à travers des expérimentations<sup>2</sup> traduisant les incertitudes sur les données, les aléas de production, les divers degrés de collaboration entre les décideurs, et d'éventuels conflits sur l'utilisation d'une ressource partagée.

<sup>1</sup> Élaboré à la suite d'entretiens effectués auprès d'industriels et de cas issus de la littérature.

<sup>2</sup> Par expérimentation, nous entendons l'évaluation de performances, au travers d'un modèle analytique que nous avons élaboré, des différentes architectures de pilotage appliquées à la planification des activités du cas-type.

Le mémoire comporte un chapitre introductif et deux parties.

Le chapitre 1 introduit les problèmes d'organisation et de gestion des activités de production auxquels sont confrontées les entreprises actuelles. Les notions de « chaîne logistique » et de « gestion de la chaîne logistique » sont définies, puis le sujet de la thèse est posé : l'analyse de performance de la planification tactique des activités de production des chaînes logistiques.

Une première partie, incluant les chapitres 2 et 3, se focalise sur la modélisation du problème de planification, qui implique non seulement le calcul d'optimisation des plans de production et d'approvisionnement, mais aussi l'environnement relationnel et informationnel des décideurs (ou « centres de décision »).

Le chapitre 2 s'intéresse ainsi à la structuration du pilotage, i.e. du système décisionnel, d'une chaîne logistique multi-rangs et multi-niveaux. Composée de centres de décision répartis ou/et hiérarchiques, l'architecture de pilotage permet d'identifier chacun de ces centres et les liens qui les unissent. En effet, pour coordonner le flux matière dans les entreprises de la chaîne logistique, ces centres de décision doivent dialoguer à travers diverses informations techniques. Nous définissons trois familles d'architectures de pilotage : distribué, mixte et centralisé, que nous cherchons par la suite à comparer à travers des jeux de simulations.

Le chapitre 3 présente le modèle analytique générique dédié à tout centre de décision que nous avons élaboré et implémenté dans un outil couplant un logiciel d'optimisation (Xpress-MP) et un tableur Excel faisant office d'interfaçage des données et des résultats de la planification avec l'environnement du centre de décision. Cet outil nous permet de simuler, à partir d'un jeu de données et pour l'architecture de pilotage choisie, la planification des centres de décision et les échanges d'information entre ces centres. Le modèle analytique, chargé de planifier les activités de production et de transport, est constitué i) d'un ensemble de contraintes traduisant le flux de matière dans le système de production tout en tenant compte de ses capacités de production, transport et stockage, et ii) d'un critère à optimiser. Par l'expression de ce critère, le centre de décision cherche à maximiser son propre profit, calculé à partir du gain des ventes auquel sont soustraits les divers coûts techniques intervenant dans la production (achat matière, stockage, fabrication, rupture de stock).

La seconde partie, plus expérimentale, utilise l'outil de résolution analytique du modèle de planification pour évaluer et comparer la performance des trois architectures de pilotage.

Dans un but de comparaison des trois architectures de pilotage, le chapitre 4 est consacré à l'évaluation de deux propriétés généralement convoitées : la robustesse et la réactivité de la planification.

Nous entendons par robustesse l'aptitude d'une solution de planification à ne pas être trop sensible aux incertitudes sur certaines données, telles que la capacité, la demande,... Pour évaluer la robustesse des trois architectures de pilotage, nous simulons une *planification statique* (horizon fixe).

Quant à la réactivité, nous la définissons comme la rapidité de réaction sur l'ensemble de la chaîne face à l'apparition d'un aléa de fonctionnement ou aux sollicitations non prévisibles de l'environnement. Ceci n'a de sens que si la planification est susceptible d'être retouchée, et nous procéderons donc à une *planification dynamique* (horizon glissant). Les données

perturbatrices sont limitées aux données du flux physique traduisant, en interne, une panne machine par exemple, ou, en externe, un retard d'approvisionnement.

Plus de 170 simulations ont été effectuées pour l'étude de la robustesse, et environ 160 simulations pour l'étude de la réactivité.

Le chapitre 5 se focalise sur une problématique particulière : le partage de la capacité de production d'une entreprise travaillant pour plusieurs chaînes logistiques. Dans ce cas, l'entreprise doit adapter la répartition de sa capacité en fonction des demandes des deux chaînes logistiques et en fonction de son propre profit. Ceci peut aboutir à des conflits, dont la résolution nécessite une négociation entre l'entreprise partagée et les centres de décision pilotant chaque chaîne. Un des paramètres importants dans la performance de la solution négociée est la pré-réservation initiale de la capacité réservée à chaque chaîne. En cas de non convergence dans la négociation, nous mettons en place des mécanismes d'aide à la convergence. Différents jeux de données sont simulés (environ 350 simulations) pour mesurer l'impact de ces paramètres et mécanismes d'aide à la planification.

Une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et présente les perspectives ouvertes à la suite de ces travaux.

---

# Chapitre 1

## Contexte, problématique et positionnement du travail de recherche

---

Sommaire :

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1   | Facteurs de complexité de la fonction « Production » au sein d'une entreprise manufacturière..... | 16 |
| 1.1.1 | Le secteur d'activités et les produits .....  | 16 |
| 1.1.2 | Le volume de production.....  | 17 |
| 1.1.3 | Le mode de production.....  | 17 |
| 1.2   | Organisation de la gestion de production.....   | 18 |
| 1.2.1 | La prise de décisions dans une entreprise : un système hiérarchisé.....                           | 19 |
| 1.2.2 | Quelques approches classiques de planification .....  | 20 |
| 1.2.3 | Les processus, supports à la mise en réseaux des entreprises et leur intégration.<br>.....        | 22 |
| 1.3   | Définition de la chaîne logistique.....   | 25 |
| 1.3.1 | Emergence historique de la chaîne logistique .....  | 25 |
| 1.3.2 | Définitions issues de la littérature scientifique .....   | 27 |
| 1.3.3 | Structure physique de la chaîne.....  | 29 |
| 1.4   | Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management - SCM) .....                             | 31 |
| 1.4.1 | Définition .....  | 31 |
| 1.4.2 | Les trois flux de la chaîne logistique.....   | 33 |
| 1.4.3 | Le système décisionnel.....   | 34 |
| 1.4.4 | Les performances .....  | 35 |
| 1.4.5 | Modélisation de la gestion de la chaîne logistique.....   | 41 |
| 1.5   | La littérature scientifique de la gestion de la chaîne logistique .....                           | 44 |
| 1.5.1 | L'abondance des publications .....  | 44 |
| 1.5.2 | Classement de la littérature .....  | 45 |
| 1.6   | Synthèse bibliographique et objectifs de la thèse.....  | 48 |



# 1 Contexte, problématique et positionnement du travail de recherche

Ce chapitre a pour but de positionner ce travail de thèse dans le vaste domaine de recherche sur les chaînes logistiques et leur gestion. Il débute par des rappels sur le fonctionnement d'une entreprise, maillon élémentaire de la chaîne logistique. Puis, nous définissons plus précisément les termes de chaîne logistique (en Anglais *Supply Chain*– SC), et de gestion de la chaîne logistique (en Anglais, *Supply Chain Management*– SCM). Une analyse de la littérature sur la gestion de la chaîne logistique est ensuite proposée. Enfin, le chapitre présente les objectifs de ce travail de thèse en les positionnant par rapport à l'état des connaissances.



*Remarque : Ces travaux de thèse se focalisent sur les chaînes logistiques en production manufacturière ; les organisations de production de services (secteur des assurances, banques, hôpitaux, ...) ne seront pas considérées ici.*

## 1.1 Facteurs de complexité de la fonction « Production » au sein d'une entreprise manufacturière

Une entreprise manufacturière a pour objectif de transformer des matières premières ou des composants reçus de ses fournisseurs et d'assembler les composants obtenus pour en faire les produits à livrer à ses clients. Les nomenclatures (relations composés-composants) et les gammes (listes ordonnées d'opérations à effectuer pour la fabrication) décrivent de manière structurée les différentes étapes nécessaires à l'obtention des produits à partir de matières premières et/ou composants, et les contraintes techniques associées.

Les facteurs de complexité d'une entreprise manufacturière n'ont cessé de se multiplier dans l'histoire industrielle et sont aujourd'hui multiples : complexité du produit (multitude de composants et d'assemblages, à l'instar d'un avion par exemple), complexité des gammes (nombreuses opérations et manipulations du produit), complexité de l'organisation de la production induite par la personnalisation des produits.

Les principales caractéristiques d'une organisation de production manufacturière sont présentées ci-après.

### 1.1.1 Le secteur d'activités et les produits

Le secteur d'activités induit le type de fonctionnement d'une entreprise. En effet, un secteur d'activités définit avant tout une classe de produits pour lesquels les modes opératoires de production sont assez semblables. Automobile, aéronautique, électronique, métallurgie, chimie, agro-alimentaire,... constituent les principaux secteurs d'activités du domaine manufacturier.

De plus, le secteur d'activités détermine d'autres spécifications des produits fabriqués (par exemple, s'ils sont périssables ou non), pouvant avoir un impact direct sur l'organisation du système de production (par exemple, gérer la durée de stockage des produits périssables).

Par ailleurs, le secteur d'activités pose d'emblée le degré de complexité des produits, des technologies et les moyens de production mis en œuvre pour leur fabrication. Dans le domaine automobile, par exemple, le nombre des seules pièces en plastique dans une voiture, est de l'ordre du millier.

### 1.1.2 Le volume de production

Dans un même secteur d'activités, le volume de production est une caractéristique majeure. Il s'agit en fait du volume de production moyen par unité de temps, c'est-à-dire la quantité moyenne de produits réalisés dans une durée donnée (jour, semaine, mois, ...). Les systèmes de production sont ainsi répartis en plusieurs catégories (Hétreux, 1996) :

- **Les systèmes de production continue** : Les produits sont des fluides, à défaut les flux de production sont quasi-continus : production électrique, industries chimiques, pharmaceutiques et certaines productions agro-alimentaires (boissons par exemple). Mais nous sortons là du domaine manufacturier.
- **Les systèmes de production en grande série** : Les produits sont fabriqués en masse. Il s'agit de produits peu diversifiés ou standardisés. Les moyens de production sont dédiés, généralement automatisés, sous forme de lignes de production spécifiques à chaque produit. Il s'agit des produits manufacturés de grande consommation (Business to Consumer).
- **Les systèmes de production en petite et moyenne série** : pour ces systèmes, les produits sont plus ou moins diversifiés, les moyens de production sont flexibles, des ressources peuvent être souvent communes à différents produits, la fabrication se fait par lots économiques. Il peut s'agir d'entreprises de grande taille, dans le secteur automobile par exemple, mais aussi de PME manufacturières et de sous-traitance.
- **Les systèmes de production unitaire** : Les produits se font sur mesure à l'unité. L'activité de conception (ou d'adaptation d'un produit déjà existant) est prédominante, d'où une planification de type gestion de projet. Ces organisations sont typiques des secteurs de l'aéronautique et du spatial, du bâtiment, des constructions navales.



*Remarque : Ce travail de thèse portera plutôt sur les systèmes de production en petites et moyennes séries, car les activités de gestion y sont les plus complexes.*

### 1.1.3 Le mode de production

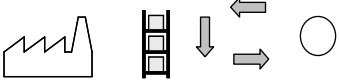
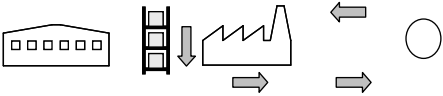
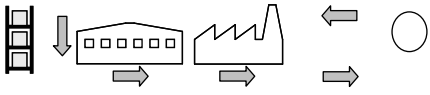
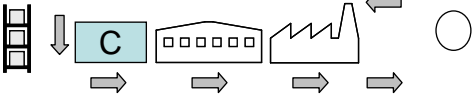
D'après Hétreux (1996), le mode de production dans son rapport avec la demande est une caractéristique à prendre en compte dans une typologie des entreprises manufacturières. On peut par ailleurs associer à ces modes un délai plus ou moins long pour le client (cf. tableau 1.1).

- **Les systèmes basés sur une production de stock ou production de masse** : l'entreprise déclenche la production lorsque le niveau du stock de produits finis passe au-dessous d'un certain seuil. Ce système fonctionne bien pour des produits standards ou avec peu d'options (gamme de produits peu évolutive), et lorsque la demande est prévisible. Ce type de production est justifiable lorsque les temps de fabrication par produit sont importants, permettant d'assurer un délai court entre commande et livraison en prélevant sur le stock de produits finis. Ce mode de production « poussé » consiste à produire selon des prévisions de ventes, en espérant par la suite que celles-ci se concrétisent.
- **Les systèmes basés sur une production ou un assemblage à la commande** : la production, et voire les approvisionnements, sont déclenchés par les demandes des clients. En cas de produits diversifiés, la commande déclenche la personnalisation du produit à partir de produits semi-finis, eux-mêmes préalablement réalisés sur la base

de prévisions de ventes. Ce système est généralement utilisé lorsque la demande est peu prévisible. Ce mode de production « tiré » consiste à ne produire que ce qui est d'ores et déjà commandé. On minimise ainsi les stocks et les en-cours, en contrepartie le délai de fabrication est ressenti par le client.

- **Les systèmes basés sur une conception à la commande** : la conception même du produit est déclenchée par la commande, ce qui implique un délai de livraison important. Ce mode de production s'applique pour des produits unitaires.

Bien entendu, une entreprise peut combiner plusieurs modes de production : sur stock pour certains produits, à la commande pour d'autres. Ceci est facteur de complexité dans l'organisation et la gestion de la production.

| Mode de production       | Délai pour le client   |   |
|--------------------------|--|---|
| Production de stock      |    | Uniquement délai de transport                                       |
| Assemblage à la commande |    | Délais d'assemblage et de transport                                 |
| Production à la commande |  | Délais du fournisseur, de production et de transport                |
| Conception à la commande |  | Délais de conception, du fournisseur, de production et de transport |

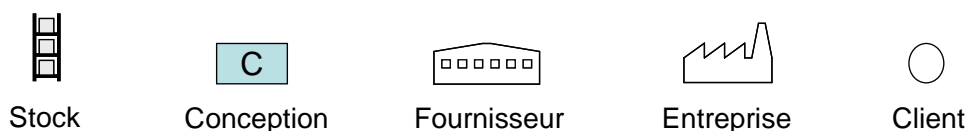


Tableau 1.1 : Délai ressenti par le client en fonction du mode de production d'après Thomas (2003)



*Remarque : Nos travaux ne porteront ni sur la production unitaire ni sur la conception à la commande, qui requièrent une organisation et gestion par projet. Nous nous intéresserons à des entreprises travaillant toutes en production ou assemblage à la commande.*

## 1.2 Organisation de la gestion de production

La production dans une entreprise est organisée, planifiée de façon à produire les produits demandés en quantité voulue et en temps voulu. Mais il faut aussi gérer la main d'œuvre, la maintenance des machines, les approvisionnements en composants, les livraisons, ... Tout ceci demande une organisation hiérarchisée (multi-niveaux) et répartie en « processus opérationnels », définie dans le paragraphe suivant.

Ensuite, nous rappellerons brièvement deux approches classiques de la gestion de production : le MRP 2 et la méthode Kanban, qui illustrent les modes de production respectivement poussé (production de stock) et tiré (production à la commande). Enfin, nous présenterons plus en détail les principaux processus opérationnels d'une entreprise.

### 1.2.1 La prise de décisions dans une entreprise : un système hiérarchisé

Le plus souvent, l'architecture décisionnelle d'une entreprise est divisée en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel, correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme. Quelques problématiques et travaux rattachés à chacun des niveaux décisionnels sont présentés ci-dessous (Ganeshan et al., 1998, Shapiro, 1999, Vincent et al., 2004, Botta-Genoulaz, 2005, Thomas et Griffin, 1996, Tan, 2001).

#### 1.2.1.1 Niveau stratégique

Ce niveau, aussi appelé *Strategic management* par Croom et al. (2000) ou encore *Strategic planning* par Thomas et Griffin (1996), 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), comme, par exemple, la recherche de nouveaux partenaires industriels, la sélection des fournisseurs et sous-traitants, mais aussi les décisions d'ouverture ou de fermeture de certains sites de production ou leur délocalisation, l'affectation d'une nouvelle zone de marché à un centre de distribution (entrepôt), le développement d'un nouveau produit, la configuration de l'usine, son mode de fonctionnement, ainsi que les objectifs financiers à atteindre (volume de production, nouveaux marchés, ...).

#### 1.2.1.2 Niveau tactique

Le niveau décisionnel tactique s'intéresse aux décisions à moyen et long terme (de quelques semaines à quelques mois) qui devront être mises en application pour déployer la stratégie décidée par l'entreprise. Les décisions de ce niveau sont prises par les cadres de la production et les chefs d'atelier. Elles portent sur les problèmes liés à la gestion des ressources de l'entreprise, en particulier la planification des activités sur ces ressources. Shapiro (1999) considère que ce niveau tactique a été très peu étudié par les industriels et les scientifiques.

#### 1.2.1.3 Niveau opérationnel

En ce qui concerne le niveau opérationnel, ou *Operational planning* selon Thomas et Griffin (1996), les décisions ont une portée plus limitée dans l'espace et dans le temps (décisions sur la journée ou sur la semaine). Elles sont prises par les chefs d'équipe et éventuellement les opérateurs de production. A ce niveau, les décisions tactiques génèrent un plan détaillé de production applicable au niveau d'un atelier ou même d'un poste de travail.



*Remarque : Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la planification des activités de production, aux niveaux tactique et opérationnel. Le niveau stratégique n'est pas traité car nous cherchons à gérer et optimiser un réseau existant plutôt que le reconfigurer.*

## 1.2.2 Quelques approches classiques de planification

Pour planifier les activités de production, les industriels utilisent principalement, sous des appellations diverses, deux approches : la méthode MRP, qui concrétise le concept de flux poussé, ou la méthode Kanban, qui met en œuvre un principe de flux tiré. Ces deux approches, largement pratiquées dans l'industrie manufacturière, sont brièvement détaillées ci-dessous.

### 1.2.2.1 L'approche MRP 2

La méthode MRP (Calcul des besoins ou *Material Requirements Planning*) vise à planifier conjointement, à partir des demandes fermes des clients ou de leurs prévisions : i) les besoins en composants, ii) les ordres de fabrication. Les besoins sont identifiés par des dates et des quantités de composants que l'on détermine à l'aide des nomenclatures et des gammes des produits ainsi que par les niveaux de stock des matières premières et des produits semi-finis nécessaires à l'élaboration des produits. En prenant en compte les divers délais (de production, d'approvisionnement), le MRP permet de proposer les ordres d'achat (commandes) envers les fournisseurs et les ordres de fabrication pour lancer la production.

Néanmoins, la méthode MRP ne prend pas en compte la capacité de production du système dont on cherche à planifier l'activité. Or, dans le cas où le cumul des charges demandées à une unité de production est supérieur à sa capacité (plan de charge incompatible avec les capacités de production), il faut procéder à un lissage de la production, c'est-à-dire redistribuer une partie de la charge dans le temps de façon à ce que le plan de production proposé soit réalisable. La méthode MRP a pour ce faire été complétée par la vérification de l'adéquation charge / capacité des postes de charge : c'est la deuxième version de la méthode, ou MRP 2 *Manufacturing Resources Planning* (Management des Ressources de Production).

Aujourd'hui, dans la plupart des entreprises manufacturières, les décisions sont hiérarchisées comme nous l'avons vu ci-dessus et s'appuient sur la méthode MRP2, qui modélise les relations nécessaires entre les données techniques, les décisions de planification et la gestion des capacités (figure 1.1).

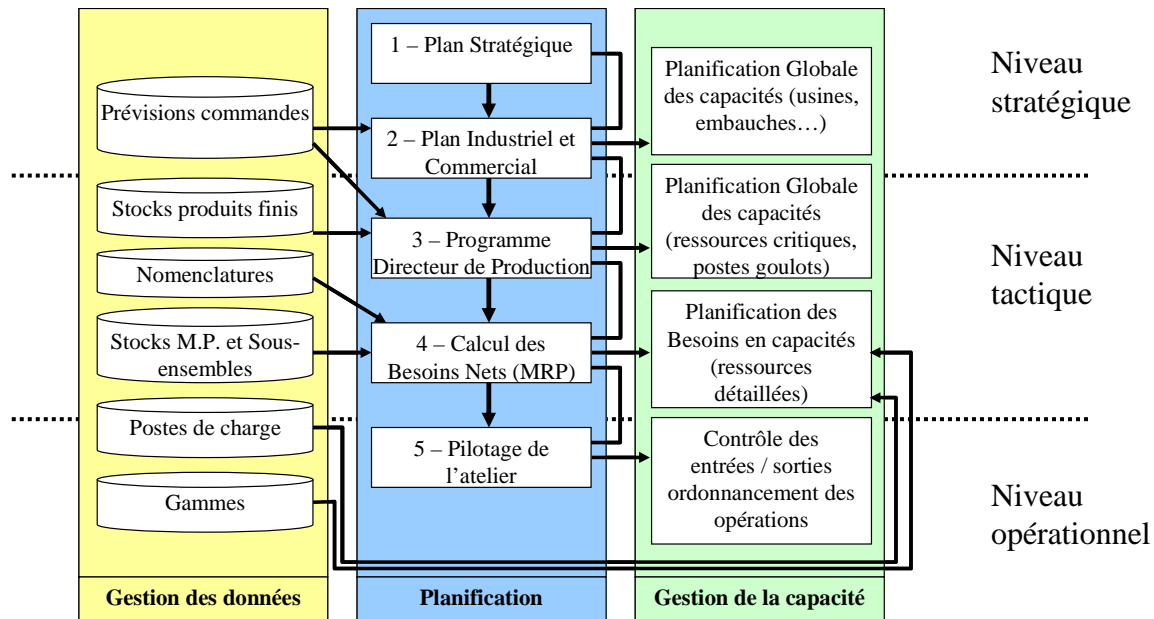


Figure 1.1 : Modélisation des décisions de planification dans le MRP2, d'après Thomas (2003)

Les plans calculés aux différents niveaux décisionnels concrétisent les options prises pour l'organisation de la production. Ces plans sont affinés d'un niveau à l'autre jusqu'à produire la planification opérationnelle de la production, souvent qualifiée de *pilotage* d'atelier :

- au niveau stratégique : le Plan Stratégique et le Plan Industriel et Commercial (PIC),
- au niveau tactique : le Programme Directeur de Production (PDP) et MRP,
- au niveau opérationnel : le pilotage de l'atelier.

### 1.2.2.2 La méthode Kanban

La méthode Kanban est une composante de la philosophie plus générale du « juste à temps » dont l'objectif est de tirer les flux-matière en les livrant juste au moment de leur utilisation, de manière à limiter (idéalement supprimer) les stocks. Le principe du « juste à temps », initialement développé par Toyota, a fait école à partir du Japon.

L'idée du flux tiré est de ne produire au stade amont que ce qui est demandé par le stade aval, qui lui-même produit en fonction de sa propre demande aval. Ainsi, le poste amont est piloté par les demandes réelles de l'aval. La méthode Kanban permet de réaliser pratiquement et simplement la remontée vers l'amont des informations relatives à la consommation réelle des produits en aval. Concrètement, le poste amont attribue à un lot de produits une étiquette (ou Kanban en japonais) qui suit les produits entre deux postes consécutifs. Dès qu'un poste utilise un lot de produits, il renvoie l'étiquette associée au poste amont lui indiquant ainsi qu'il faut fabriquer de nouveau un lot de produits pour réapprovisionner le stock du poste en aval. Le poste amont ne peut produire qu'en présence de Kanban (cf. figure 1.2).

Contrairement à la méthode MRP qui calcule les plans de production pour tous les postes (décision centralisée), la méthode Kanban ne fait que transmettre les informations sur les consommations de produit de proche en proche (décisions distribuées diffusant d'un poste à l'autre).

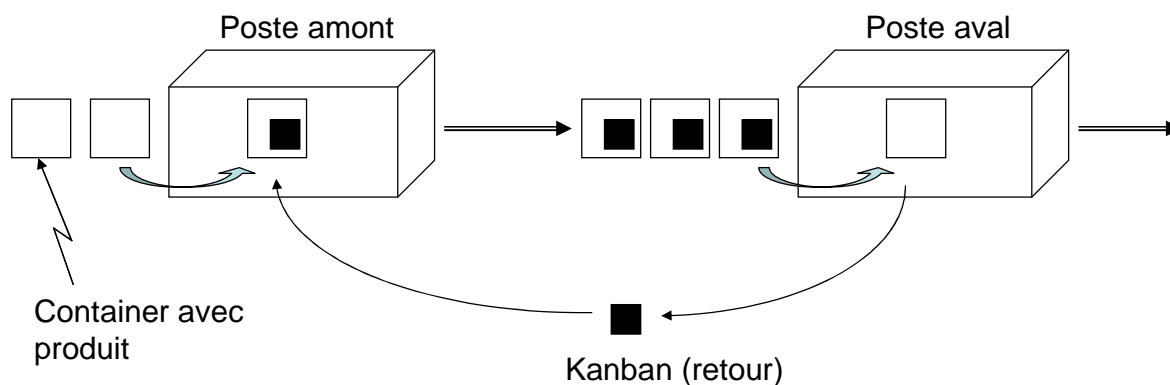


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement de la méthode Kanban

Avec la méthode Kanban, la quantité de stock maximale est réglée par le nombre de Kanbans. En diminuant le nombre de Kanbans, on diminue d'autant le niveau d'en-cours du produit entre les postes.

Pour que la méthode Kanban fonctionne bien, il est préférable d'avoir :

- des produits standards pour réduire le nombre de changements de série,
- des délais courts (délai de changement de série, délai de réapprovisionnement),
- une production par lignes de produits (flow-shop),
- des demandes suffisamment régulières pour s'accommoder d'un dimensionnement du nombre de Kanbans réalisé une fois pour toutes.

### 1.2.3 Les processus, supports à la mise en réseaux des entreprises et leur intégration

Un processus opérationnel (ou *Business Process*, en anglais) est un ensemble d'activités qui définit des rôles et des relations, et qui systématise l'organisation et la politique d'une entreprise dans le but d'atteindre certains des objectifs de cette entreprise.

Nous rappelons ici les quatre processus principaux d'une entreprise, qui sont l'approvisionnement, la production, la distribution et la vente.

Stadtler et Kilger (2000) se réfèrent à ces quatre processus-clés pour proposer la classification SCP-Matrix des tâches de planification (cf. figure 1.3) en fonction des niveaux décisionnels.

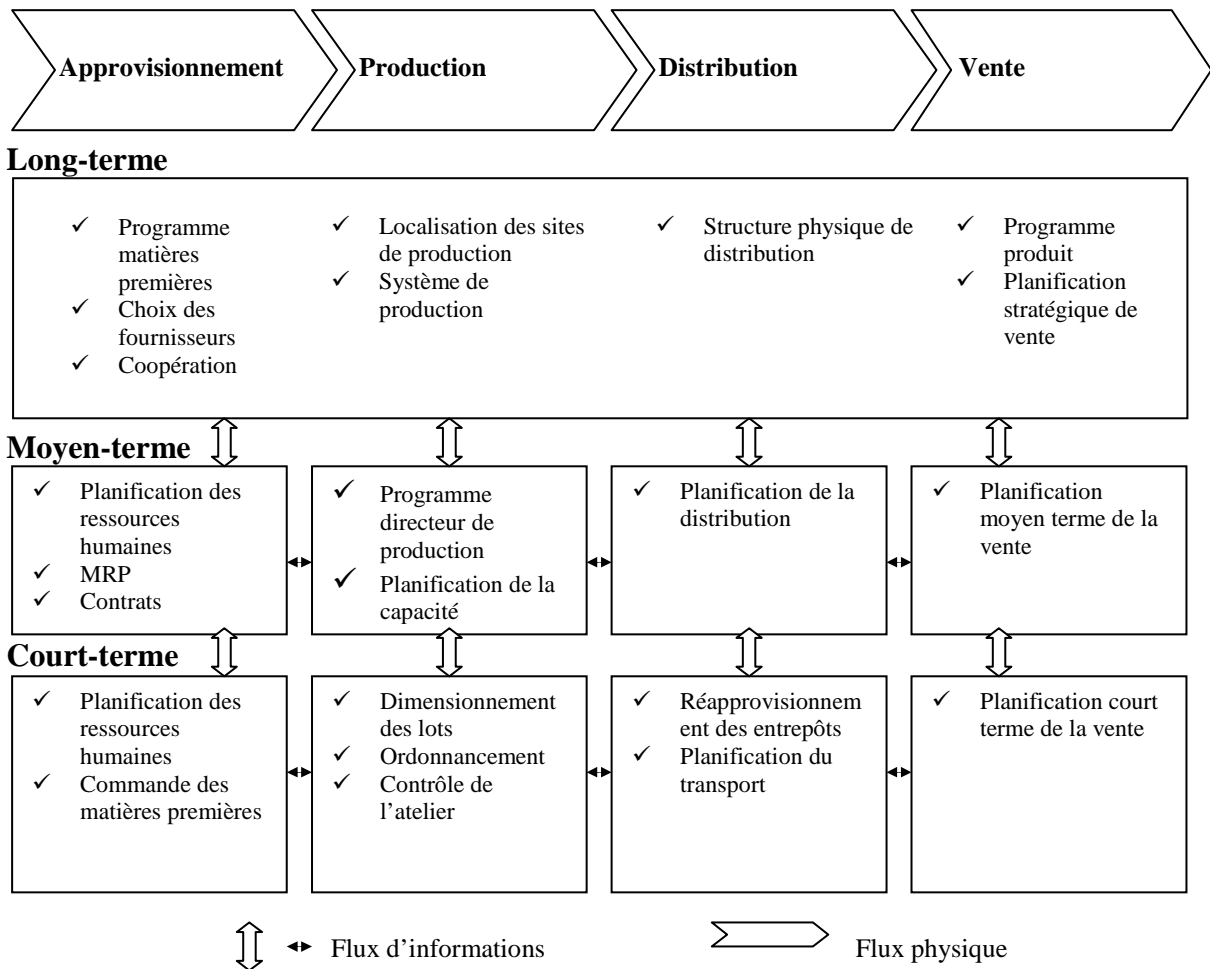


Figure 1.3 : SCP-Matrix, d'après Stadtler et Kilger (2000)

### 1.2.3.1 Le processus Approvisionnement

Le processus Approvisionnement se concentre sur la fourniture de tous les composants nécessaires à la fabrication. Deux grandes phases sont ici à distinguer. La première phase consiste à sélectionner les fournisseurs de l'entreprise. Le choix des fournisseurs peut se faire sur différents critères comme la qualité, le prix, les délais de réapprovisionnement des matières premières ou composants, mais aussi leur capacité de production, leur facilité à accepter une demande très variable, leur possibilité de faire évoluer techniquement les composants... Il est possible de sélectionner un fournisseur unique par produit ou, au contraire, des sources multiples qui se partagent la demande, en minimisant ainsi le risque de rupture de livraison.

Les fournisseurs étant déterminés, la seconde phase du processus Approvisionnement consiste à passer les commandes des composants à ces fournisseurs en fonction de la production à réaliser. Il s'agit aussi de vérifier que ces composants sont livrés dans de bonnes conditions, c'est-à-dire de vérifier que la livraison comporte les bons composants, de qualité requise, en quantité conforme et au bon moment.

Le processus Approvisionnement regroupe ainsi toutes les relations avec les fournisseurs pour assurer les niveaux de stocks en composants nécessaires et suffisants pour la fabrication.



### **1.2.3.2 Le processus Production**

Le processus Production concerne l'ensemble des transformations que vont subir les composants pour réaliser les produits finis de l'entreprise. L'objectif du processus Production est de fabriquer les produits requis tout en assurant la productivité du système (notamment par un taux élevé d'utilisation des ressources mobilisées).

Les méthodes utilisées pour la gestion de la production cherchent à améliorer le flux des produits dans les ateliers de fabrication à travers la planification et l'ordonnancement, la détermination de la taille optimale des lots de production, la détermination des séries économiques. Des approches multi-niveaux ont été développées dans le but de réduire la complexité des problèmes d'optimisation : planification multi-niveaux (Hétreux, 1996, Lecompte-Alix, 2001), ordonnancement hiérarchisé (Hatchuel et al., 1997, Fontan et al., 2005...). La principale difficulté dans l'exercice de la planification est la gestion de l'incertitude des informations (Stadtler et Kilger, 2000). Les données utilisées, telles que les plans de demandes, sont en effet issues de modèles de prévisions hypothétiques. De ce fait, la disponibilité des produits et des ressources de production en situation réelle, et par suite, le niveau de service ne sont pas toujours « au rendez-vous ».

### **1.2.3.3 Le processus Distribution**

Le processus Distribution concerne la livraison des produits finis aux clients et reprend les questions d'optimisation des réseaux de distribution : l'organisation et le choix des moyens de transport, le choix du nombre d'étages (ou d'intermédiaires) dans le réseau de distribution ainsi que le positionnement des entrepôts et leur mode de gestion. Par exemple, les produits peuvent être acheminés en nombre par train et regroupés dans un entrepôt pour être livrés ensuite par camion aux clients d'une même zone géographique, en vue du meilleur compromis entre qualité de service et coût économique.

### **1.2.3.4 Le processus Vente**

Le processus Vente, mis en œuvre par le service commercial, développe les relations envers le client (négociation des prix et des délais, enregistrement des commandes, ...) et par extension, recherche une meilleure connaissance du marché. Ce processus de l'entreprise est également chargé de définir la demande prévisionnelle et d'intégrer des aspects commerciaux comme la durée de vie du produit pour anticiper l'évolution de ses ventes. Les aspects marketing (analyse de marché, publicité, promotions, ...) sont aussi gérés dans ce processus.

### **1.2.3.5 Interactions entre les processus et autres « services »**

Les quatre processus-clés de l'entreprise doivent interagir afin de prendre des décisions cohérentes sur l'ensemble de l'entreprise. Par exemple, le processus Vente communique régulièrement le carnet de demandes des clients au processus Approvisionnement pour que celui-ci prépare les achats de composants. Les processus Production et Distribution suivent les niveaux de stocks (composants, en-cours) dans les différents entrepôts et renseignent le processus Approvisionnement... Les processus Approvisionnement, Production et Distribution doivent aussi se coordonner pour la régulation des stocks et notamment pour la détermination de stocks de sécurité qui permettent de faire face aux aléas de la production (panne, production de mauvaise qualité,...) et à l'incertitude de la demande (prévisions).

Tan (2001) met en avant l'importance de la gestion des stocks dans une entreprise (et même dans la chaîne logistique) en se focalisant sur les gains que l'on peut espérer en améliorant les

processus de gestion des stocks par un meilleur système d'information qui prend en compte leur localisation et leur état (en attente, en-cours de fabrication ou fabriqué, dans une perspective de suivi d'activité) ou par une meilleure prévision de la demande client. Il faut aussi assurer le réajustement périodique des plans de production en fonction du suivi de la demande et de la production réelle : des calculs réguliers ou périodiques correspondent à une planification à horizon glissant. Par contre, dans la planification orientée événements, les plans ne sont pas faits dans des intervalles de temps réguliers, mais plutôt lors d'un événement important tel que la panne d'une machine ou des événements importants dans les commandes des clients. Une telle procédure demande une mise à jour continue des données nécessaires à la planification (stocks, en-cours,...), afin que celles-ci soient disponibles lorsqu'un événement survient.

D'autres services annexes sont également nécessaires dans les entreprises : service des ressources humaines, service comptabilité, service conception ou bureau d'étude pour l'amélioration des produits ou l'élaboration de nouveaux produits, ... sans oublier le service après vente, pour gérer le retour des produits défectueux, leur réparation, voire leur destruction et/ou leur recyclage.

Parmi ces processus, certains sont fondamentaux pour interfacer les entreprises entre elles. A l'évidence, dans une relation client-fournisseur, le processus Vente de l'entreprise « fournisseur » est en relation directe avec le processus Achat de l'entreprise « client ». Et c'est justement ce lien, certes ancestral dans l'histoire de l'économie, qui, étendu à un partenariat multi-entreprises, est à l'origine de la notion de Chaîne Logistique.

### **1.3 Définition de la chaîne logistique**

#### **1.3.1 Emergence historique de la chaîne logistique**

Quels sont les ressorts stratégiques des partenariats d'entreprises? Quelles sont les évolutions qui ont mené au concept actuel de *Supply Chain Management* (SCM – Gestion de la chaîne logistique) ?

De 1950 à 1970, l'économie est basée sur l'offre : les entreprises produisent principalement sur stock. Cette production de masse a pour objectif de minimiser les coûts de production. Mais ces inconvénients sont i) la lenteur pour le développement et l'industrialisation de nouveaux produits et ii) la nécessité de stocks devant les opérations « goulots », induisant des immobilisations financières (Tan, 2001).

La période 1970-1980 voit l'essor d'une économie basée sur la demande où les entreprises produisent à la commande. Les managers prennent conscience des coûts induits par les stocks, lors de l'introduction du MRP, puis du MRP II. Dans les années 1980, les bouleversements des marchés (mondialisation, concurrence accrue) et les exigences de performance financière, combinés aux progrès technologiques (TIC, nouveaux procédés...) ont forcé les grands groupes à proposer des produits de bonne qualité à bas prix. Dans le but d'améliorer les rendements et les temps de cycle de production par rapport à la concurrence, les entreprises utilisent alors des méthodes de management telle que le « juste à temps » (JIT : Just-in-time), qui permet de limiter les stocks de composants en organisant et ordonnant précisément l'approvisionnement avec les fournisseurs (Frein, 2003 et Monateri, 2003). C'est dans ce contexte que les entreprises se rendent compte de l'importance de la relation stratégique client-fournisseur, prémisses du SCM, au départ uniquement orienté « approvisionnement »

avec les fournisseurs directs. Parallèlement, des consultants et experts sur la gestion logistique (Lambert et Cooper, 2000) ont disséminé les concepts de *materials management* et de *DRP (Distribution Resource Planning)*, une étape supplémentaire pour définir les fonctions transport et distribution physique de la chaîne logistique. L'ajout de la fonction distribution à la partie approvisionnement forme la « logistique intégrée », connue aussi sous le nom de gestion de la chaîne logistique ou *Supply Chain Management (SCM)* (Tan, 2001).

De 1990 à nos jours, le SCM s'étend à tous les fournisseurs (sur plusieurs rangs) et à toutes les entités de la distribution (entrepôts, grossistes, détaillants). De ce fait, on ne peut plus réellement parler de SCM focalisé sur une entreprise (Thierry et Bel, 2002). Désormais, le SCM se centre davantage sur une famille de produits finis. L'idée de cette intégration est de répandre les bonnes pratiques de gestion à tous les maillons de la chaîne afin d'améliorer globalement la performance de la chaîne (par exemple, en évitant de contrôler deux fois la qualité des produits : à la sortie de l'entreprise-fournisseur et à l'entrée de l'entreprise-client). C'est le *Supplier development* : l'entreprise-client va chercher à aider ses fournisseurs pour améliorer certains points comme la diminution du temps de cycle, l'amélioration de la qualité de production, la réduction des coûts de production et de transport. Ce programme est un effort sur le long terme. Un tel partenariat rend aussi possible l'exploitation de la force des fournisseurs (ou plus généralement des autres maillons de la chaîne) pour le développement et la conception de nouveaux produits (Tan, 2001).

A l'extrême, le revers de la médaille de collaborations trop poussées, est que, pour une entreprise-client, changer de fournisseur devient extrêmement coûteux et rend celle-ci très dépendante des choix de ses fournisseurs (Tan, 2001).

D'après la littérature scientifique (Ganeshan et al., 2000), l'origine du SCM provient du *materials management* (gestion des produits) et du *physical distribution* (distribution physique) après la seconde guerre mondiale, ainsi que du domaine du *functional logistics* (logistiques fonctionnelles – différents managers pour toutes les fonctions) et de l'*integrated logistics* (logistiques intégrées – un seul manager pour toutes les fonctions). En 1958, Forrester a commencé à étudier les logistiques fonctionnelles en utilisant une approche systémique. En 1961, il décrit l'amplification de la demande lorsqu'elle remonte la chaîne vers les fournisseurs. Ce phénomène porte d'ailleurs son nom, effet Forrester, ou encore l'effet boule de neige (*bullwhip effect*), que l'on retrouve dans le jeu de la bière (*beer game*). Puis en 1969, Bowersox discute de l'évolution de la logistique intégrée et évoque ce qui deviendra plus tard la chaîne logistique, en considérant que les entreprises sont reliées entre elles par le flux physique.

Beaucoup de disciplines (recherche opérationnelle, dynamique des systèmes, management des activités, science du management, marketing, économie, ...) ont contribué aux concepts du SCM, comme la gestion et le contrôle des stocks (juste-à-temps, Kanban pour le réapprovisionnement des stocks, stocks multi-échelons<sup>1</sup>,...), l'allocation d'ordres de production, la planification des activités de production et de distribution...

L'optimisation de la chaîne logistique a commencé par la maîtrise des coûts et de l'efficacité interne des entreprises. Ces travaux portaient principalement sur des organisations mono-atelier / mono-opération ou mono-atelier / multi-opérations (flowshop, jobshop). A partir des années 90, les études s'étendent à des organisations plus complexes de type flowshop hybride ou jobshop avec machines dupliquées (Botta-Genoulaz, 2000 et 2005). Enfin, les scientifiques essaient de fixer une structure, un cadre au SCM. D'après Tan (2001), ils travaillent sur deux grands axes : i) la partie achat et approvisionnement et ii) la partie transport et logistique. L'intégration de ces deux parties dans un même modèle semble difficile. En effet, il n'y a

---

<sup>1</sup> Plusieurs entreprises en cascades.

guère de but commun, si ce n'est le fait de satisfaire la demande du client. Cependant, petit à petit, les chercheurs ont élargi leur domaine d'étude en passant de l'atelier à l'usine, puis de l'usine à la chaîne logistique en vue d'une optimisation plus globale des systèmes de production, grâce notamment aux avancées dans les technologies de l'information, les modèles mathématiques et autres outils d'optimisation.

De nos jours, la problématique SCM peut se découper en plusieurs domaines, tels que la conception ou re-conception de la chaîne, la gestion des risques industriels (non amortissement des coûts de développement, d'industrialisation et de production), l'évaluation de performances, la planification des activités, la gestion des stocks, la gestion des transports, le système d'information, la négociation (ou entente industrielle), les aspects sociologiques, les aspects économiques et financiers, l'aide à la décision...

## 1.3.2 Définitions issues de la littérature scientifique

### 1.3.2.1 La logistique

Le mot « logistique » apparaît en France au XVIII<sup>e</sup> siècle, lorsque les problèmes de soutien à la stratégie militaire (réapprovisionnement en armes, munitions, vivres, chevaux, uniformes, chaussures...) ne furent plus négligés.

Ce terme s'est ensuite répandu, dans le milieu industriel notamment, pour évoquer principalement la manutention et le transport des marchandises.

Jusqu'aux années 70, la logistique n'avait que peu d'importance dans la gestion des entreprises, considérée comme une fonction secondaire, limitée aux tâches d'exécution dans des entrepôts et sur les quais d'expédition. 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-matière, en vue de la qualité du service aux clients tout en permettant l'optimisation des ressources et la réduction des coûts.

Jadis locale et basique, la logistique devient, au milieu des années 90, une fonction globalisée voire mondialisée de gestion du flux physique dans une vision complète de la chaîne Clients/Fournisseurs, et constitue véritablement une nouvelle discipline du management des entreprises. La « logistique globale » représente ainsi l'ensemble des activités internes ou externes à l'entreprise qui apportent de la valeur ajoutée aux produits et des services aux clients (Courty, 2003).

L'ouverture vers le marché mondial n'est pas sans problème pour l'entreprise, qui peut éprouver des difficultés à décloisonner ses activités et à communiquer aussi bien en interne (entre ses différents services) qu'en externe avec des entreprises partenaires. L'évolution vers la logistique globale met en avant un certain nombre de points clés pour la mise en œuvre des partenariats d'entreprise (Courty, 2003) :

- ✓ Trouver des partenaires avec qui partager une vision globale de la problématique logistique,
- ✓ Définir le périmètre de la coopération : quelles informations doivent être échangées (dilemme coopération/protection) ?
- ✓ Donner une vision du fonctionnement cible,
- ✓ Informer et former les divers opérateurs pour établir une culture logistique interne et externe,
- ✓ Aligner les processus internes et externes,
- ✓ Se comparer aux meilleures pratiques,
- ✓ Choisir les outils adaptés pour la mise œuvre opérationnelle d'une logistique performante.

### 1.3.2.2 La chaîne logistique (Supply Chain - SC)

Le terme « chaîne logistique » vient de l'anglais *Supply Chain* qui signifie littéralement « chaîne d'approvisionnement ».

Il existe une multitude de définitions de la « chaîne logistique » : il n'y a pas une définition universelle de ce terme. Le tableau 1.2 recense quelques-unes des définitions rencontrées dans la littérature :

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Christopher, 92                      | La chaîne logistique peut être considérée comme le réseau d'entreprises qui participent, en amont et en aval, aux différents processus et activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services apportés au consommateur final. En d'autres termes, une chaîne logistique est composée de plusieurs entreprises, en amont (fourniture de matières et composants) et en aval (distribution), et du client final.   |
| Lee et Billington, 93                | La chaîne logistique est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client.  |
| La Londe et Masters, 94              | Une chaîne logistique est un ensemble d'entreprises qui se transmettent des matières. En règle générale, plusieurs acteurs indépendants participent à la fabrication d'un produit et à son acheminement jusqu'à l'utilisateur final - producteurs de matières premières et de composants, assembleurs, grossistes, distributeurs et transporteurs sont tous membres de la chaîne logistique.  |
| Ganeshan et al, 95                   | Une chaîne logistique est un réseau d'entités de production et de sites de distribution qui réalise les fonctions d'approvisionnement de matières, de transformation de ces matières en produits intermédiaires et finis, et de distribution de ces produits finis jusqu'aux clients. Les chaînes logistiques existent aussi bien dans les organisations de service que de production, bien que la complexité de la chaîne varie d'une industrie à l'autre et d'une entreprise à l'autre. |
| Tayur et al, 99                      | 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'information dans les deux sens.   |
| Rota-Franz, 98, Rota-Franz et al, 01 | La chaîne logistique d'un produit fini se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime. Le produit considéré est, dans le domaine aéronautique, l'avion qui peut être qualifié de produit-système étant donné sa complexité.  |
| Stadlter et Kilger, 00               | Une chaîne logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physique, informationnel et financier. Ces organisations peuvent être des entreprises produisant des composants, des produits intermédiaires et des produits finis, des prestataires de service logistique et même le client final lui-même.  |
| Mentzer et al, 01                    | Une chaîne logistique est un groupe d'au moins trois entités directement impliquées dans les flux amont et aval de produits, services, finances et/ou information, qui vont d'une source jusqu'à un client.   |
| Génin, 03                            | Une chaîne logistique 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 chaîne logistique à l'autre.   |
| Lummus et Vokurka, 04                | Toutes les activités impliquées dans la livraison d'un produit depuis le stade de matière première jusqu'au client en incluant l'approvisionnement en matière première et produits semi-finis, la fabrication et l'assemblage, l'entreposage et le suivi des stocks, la saisie et la gestion des ordres de fabrication, la distribution sur tous les canaux, la livraison au client et le système d'information permettant le suivi de toutes ces activités.                              |

Tableau 1.2 : Définitions de la chaîne logistique

D'autres termes semblables ou proches de « chaîne logistique » sont aussi plus ou moins utilisés : entreprise étendue, entreprise virtuelle, entreprise réseau, réseau d'entreprises, entreprise fédérale, entreprises en trèfle, en grappe, fractale, organisation triple I, joint-venture, consortium d'entreprises, constellations d'entreprises,... Il existe bien sûr des nuances ou des particularités entre tous ces termes, mais qui ne sont pas détaillées ici. Pour des définitions plus précises, se reporter par exemple à Hammami (2003).

Ces définitions peuvent cependant se catégoriser suivant leur orientation principale. La chaîne logistique peut ainsi se définir en tant que :

- succession de relations Client/Fournisseur (Tayur et al, 1999),
- succession d'activités de création de valeur (cf. figure 1.4) (La Londe et Masters, 1994),
- fonctions ou processus : approvisionnement, transformation, distribution (Lee et Billington, 1993).

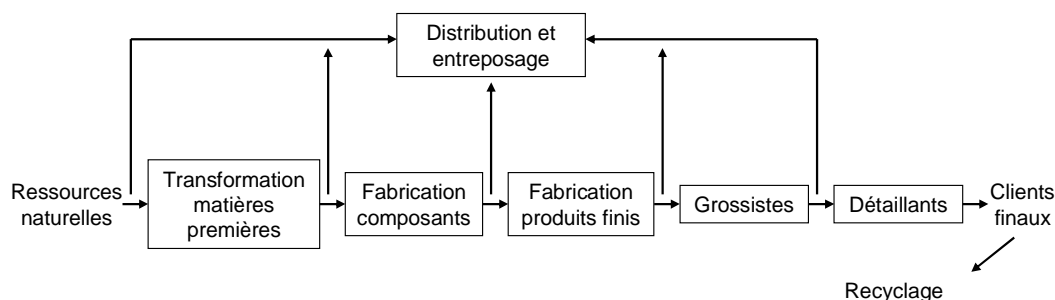


Figure 1.4 : Activités et entreprises de la chaîne logistique, d'après La Londe et Masters (1994)

Les différentes définitions de la chaîne logistique reprennent cependant un certain nombre d'idées communes (Hammami, 2003). Pour notre part, nous considérerons que :

- 1) Une chaîne logistique se rapporte généralement à un produit fini ou à une famille de produits finis donnés.
- 2) Elle fait intervenir plusieurs entreprises.
- 3) Ces entreprises sont liées entre elles par trois flux : le flux d'information (passage de commandes, par exemple), le flux physique (transfert de marchandises) et le flux financier (règlement des achats). Nous détaillerons ces flux au §1.4.2.
- 4) Chacune des entreprises partenaires assure les fonctions d'approvisionnement, de transformation / production, de distribution et de vente. Ce sont les 4 processus clés que l'on rencontre dans toute entreprise.
- 5) Enfin, une entreprise est potentiellement impliquée dans plusieurs chaînes logistiques. En effet, une entreprise cherche généralement à multiplier ses entreprises-clients et ses produits peuvent servir à l'élaboration de plusieurs produits finis.

### 1.3.3 Structure physique de la chaîne

La structure topologique d'une chaîne logistique peut prendre différentes formes, en particulier deux topologies élémentaires de réseaux (cf figure 1.5) (Huang et al., 2003, Croom et al., 2000, Lambert, 2000, Min et al., 2002) :

- 1) Structure convergente : c'est le cas de la filière automobile si l'entreprise considérée est un constructeur de voitures, ses fournisseurs de rang 1 sont des équipementiers (carrosserie, siège, pare-brise,...), les fournisseurs de rang 2 sont, par exemple pour les sièges, les fournisseurs de matériaux textiles,...
- 2) Structure divergente : le cas est fréquent dans l'industrie électronique si l'entreprise considérée est un fournisseur de cristaux de silicium, les clients de rang 1 sont des constructeurs de puces, les clients de rang 2 sont des constructeurs de circuits intégrés, enfin, les clients de rang 3 sont par exemple les assembleurs de téléphones mobiles.

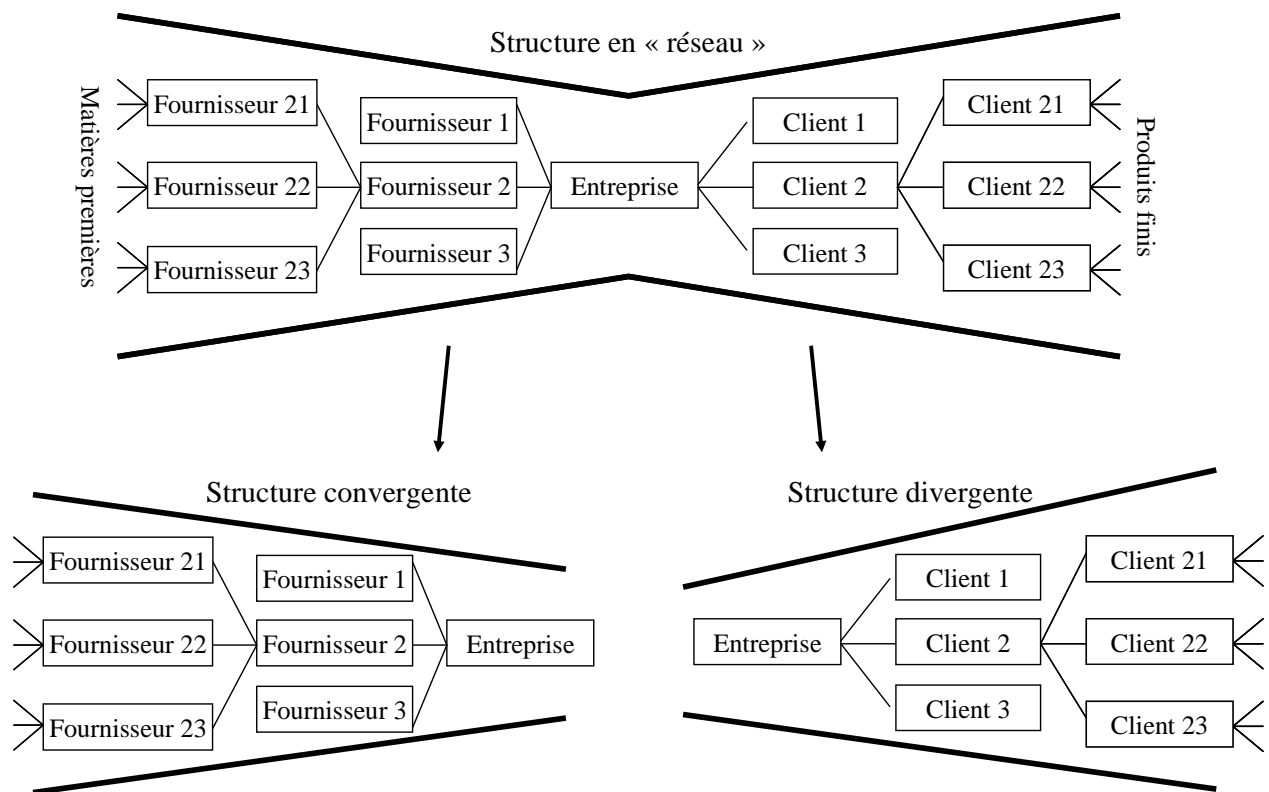


Figure 1.5 : Structures élémentaires d'une chaîne logistique

La plupart des chaînes logistiques combinent ces deux structures élémentaires.

En effet, une structure purement convergente signifie l'absence de réseaux de distribution pour la vente des produits. Ainsi, pour la filière automobile, la chaîne est convergente pour toute la partie production, mais il existe une chaîne aval correspondant aux concessionnaires et autres points de vente de véhicules.

De même, une structure purement divergente est improbable, car cela signifierait que le produit fini ne découle que d'un fournisseur amont...

Généralement, la topologie d'une chaîne logistique est donc de type « réseau » (cf. figure 1.5), avec des ramifications plus ou moins grandes. Ainsi certaines chaînes logistiques peuvent s'avérer très étendues, en particulier pour des produits complexes : une entreprise peut ainsi se trouver en rapport avec plusieurs centaines de fournisseurs. Pour les grands réseaux, Lambert et Cooper (2000) et Min et Zhou (2002) proposent de classer les acteurs de la chaîne en deux catégories : les membres essentiels (acteurs industriels majeurs contribuant à l'élaboration du produit) et les membres secondaires (consultants, banques, partenaires de recherche, ...). Pour la recherche de performances, ces auteurs proposent alors de se concentrer sur les membres essentiels seulement et même sur certaines relations uniquement, notamment les relations avec les fournisseurs des composants les plus onéreux ou les plus critiques. On peut ainsi restreindre le réseau à optimiser.

L'étude peut se porter aussi sur une seule relation client-fournisseur (chaîne minimale ou structure dite dyadique – Kehoe et Boughton, 2001), en itérant ensuite le raisonnement sur l'ensemble des relations présentes dans une véritable chaîne logistique.



*Remarque : Nous avons considéré dans ce travail de thèse des chaînes logistiques de structure complexe, qui sont le siège de phénomènes inertiels que nous avons cherchés à mettre en évidence.*

## 1.4 Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management - SCM)

### 1.4.1 Définition

Une chaîne logistique existe dès lors qu'au moins deux entreprises travaillent sur l'achèvement d'un produit donné. Si et seulement si cette association est délibérément pilotée en vue d'en maximiser la performance, alors on peut parler de gestion de la chaîne logistique. Il existe ainsi une distinction entre la « chaîne logistique » et la « gestion de la chaîne logistique » (SCM-Supply Chain Management). Ici encore, on relève plusieurs définitions de la gestion de la chaîne logistique (Mentzer et al., 01). Beaucoup d'auteurs soulignent la difficulté de définir le SCM. Voici quelques définitions, issues notamment de Croom et al. (2000) :

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Jones et Riley, 1985        | La gestion de la chaîne logistique est une approche intégrative pour s'accorder sur la planification et le contrôle du flux physique depuis les fournisseurs jusqu'à l'utilisateur final.   |
| Berry et al., 1994          | La gestion de la chaîne logistique vise à construire une confiance, à échanger des informations sur les besoins du marché, à développer de nouveaux produits et à réduire la base de fournisseurs d'une entreprise afin de libérer des ressources de gestion pour le développement de relations significative sur le long terme.  |
| Thomas et Griffin, 1996     | La gestion de la chaîne logistique 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.   |
| Tan et al., 1998            | La gestion de la chaîne logistique englobe la gestion des approvisionnements et des marchandises depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au produit fini (et aussi de son éventuel recyclage). La gestion de la chaîne logistique se focalise sur la façon dont les entreprises utilisent les processus, la technologie et l'aptitude à améliorer la compétitivité de leurs fournisseurs. C'est une philosophie de management qui prolonge les activités classiques intra-entreprise, rassemblant l'ensemble des partenaires commerciaux avec un but commun d'optimisation et d'efficience. |
| Simchi-Levi et al., 2000    | La gestion d'une chaîne logistique (ou Supply Chain Management) 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.   |
| Geunes et Chang, 2001       | La gestion de la chaîne logistique est la coordination et l'intégration des activités de la chaîne logistique avec l'objectif d'atteindre un avantage compétitif viable. La gestion de la chaîne logistique comprend donc un large panel de problématiques stratégiques, financières et opérationnelles.  |
| 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.  |
| Dominguez et Lashkari, 2004 | L'intérêt du Supply Chain Management (SCM) est de faciliter les ventes en 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 est 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.  |

Tableau 1.3 : Définitions de la gestion de la chaîne logistique



Dans certaines définitions, il est question de chaîne logistique intra- ou inter-entreprises. Une chaîne logistique intra-entreprise est un réseau de sites de production géographiquement dispersés, mais qui appartiennent tous à une même entreprise-mère. Ce type de réseau est souvent appelé « entreprises multi-sites ». A contrario, une chaîne logistique inter-entreprises est un réseau d'entreprises économiquement et juridiquement indépendantes (Stadler et Kilger, 2000). Dans ce cas, le dilemme entre confidentialité des données et recherche d'une performance globale s'avère être un problème de fond.

Dans toutes les définitions précédentes, la notion de chaîne logistique est bien sûr présente à travers les termes de « réseaux d'entreprises » ou « réseaux d'entités ». L'aspect gestion se fait plutôt ressentir comme une façon d'intégrer et de faire interagir toutes ces entreprises entre elles. Ainsi, Cooper et al. (Cooper et al., 1997, Lambert et Cooper, 2000), schématisent (cf. figure 1.6) la gestion de la chaîne logistique comme des activités transverses (Gestion des demandes, Réalisation des commandes, Gestion du flux des produits,...) qui interagissent avec toutes les activités propres à chaque entreprise traversée (Production, Achat, Logistique,...). La communication entre les acteurs reste capitale comme le montre le flux d'information qui traverse l'ensemble de la chaîne logistique.

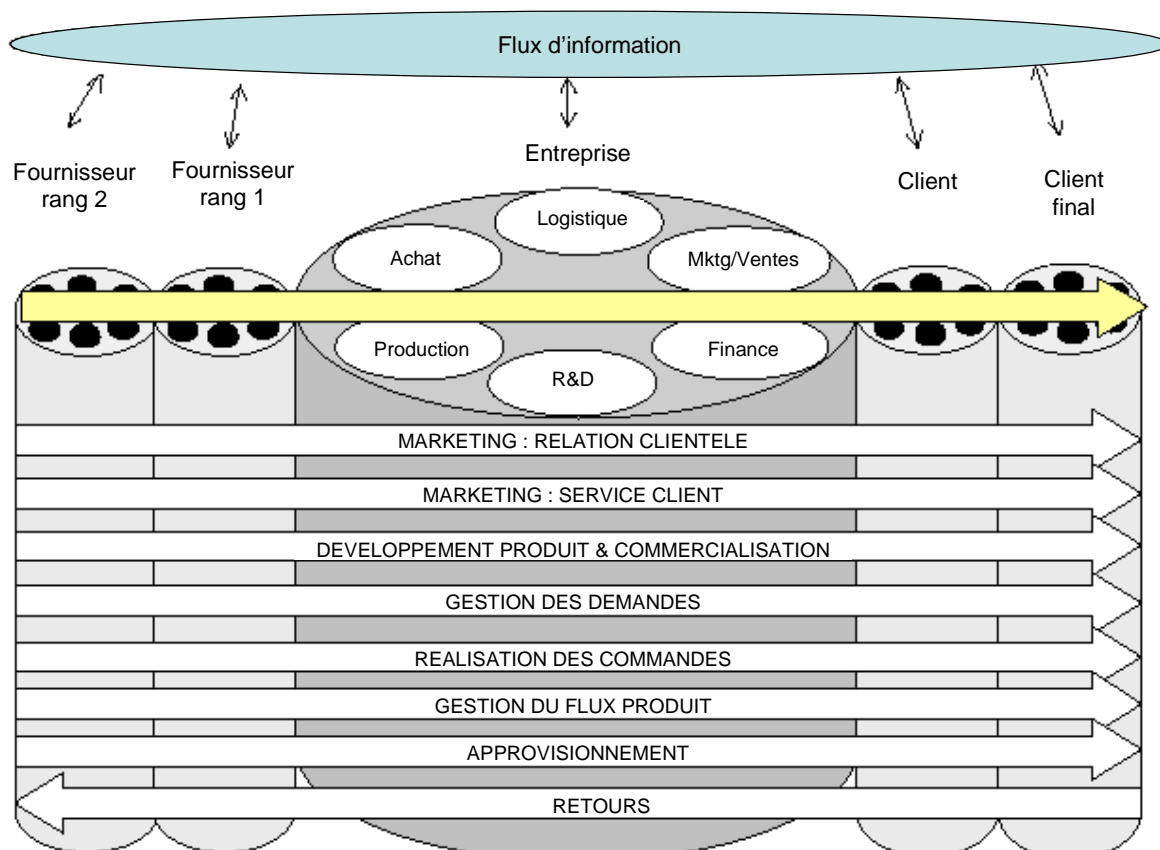


Figure 1.6 : Supply Chain Management, d'après Cooper et al., 1997

Pour notre part, nous adopterons la définition suivante de la gestion de la chaîne logistique : La gestion d'une chaîne logistique est une approche intégrative pour s'accorder sur la planification et le contrôle du flux physique entre tous les intervenants de la chaîne logistique (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.

Le principal objectif du SCM est d'améliorer la compétitivité industrielle en minimisant les coûts, en assurant le niveau de service requis par le client, en allouant efficacement les activités sur les acteurs de production, distribution, transport et d'information, en veillant à ce que les acteurs ne développent pas de comportements locaux antagonistes venant grever la performance globale.

### **1.4.2 Les trois flux de la chaîne logistique**

Nous détaillons ici les trois flux traversant une chaîne logistique : flux d'information, physique et financier. Ces trois flux peuvent découler des règles stipulées dans le contrat de partenariat. En effet, des contrats définissent les relations entre chaque entreprise de la chaîne logistique, prévoyant notamment des pénalités en cas de retard de livraison d'un fournisseur ou de rupture de stock, déterminant qui gère le transport et les stocks entre deux « maillons » de la chaîne, ...

#### **1.4.2.1 Le flux d'information**

Le flux d'information représente l'ensemble des transferts ou échanges de données entre les différents acteurs de la chaîne logistique. Il s'agit en premier lieu des informations commerciales, notamment les commandes passées entre clients et fournisseurs. Une commande comprend généralement la référence du produit, la quantité commandée, la date de livraison souhaitée et le prix éventuellement négocié lors de la vente. D'autres éléments peuvent s'ajouter à cette liste : la liste des options désirées pour le produit, la fréquence de livraison si besoin, ... Mais les entreprises s'échangent aussi des informations plus techniques : paramètres physiques du produit, gammes opératoires, capacités de production et éventuellement de transport, informations de suivi des niveaux de stock. Ces dernières sont de plus en plus réclamées par les clients qui souhaitent connaître l'état d'avancement de fabrication de leur produit. De manière plus générale, le principe de traçabilité se traduit par un droit de regard accru du client envers le fournisseur (Dupuy et al., 2004).

Le flux d'information est de plus en plus rapide grâce aux progrès des TIC. Le développement des flux d'information au sein de la chaîne logistique trouve ses limites dans le besoin de confidentialité entre acteurs. Par ailleurs, le problème de la qualité des données véhiculées subsiste, et le risque existe que des décisions soient basées sur des données erronées ou simplement périmées.

#### **1.4.2.2 Le flux physique**

Le flux physique est constitué par le mouvement des marchandises transportées et transformées depuis les matières premières jusqu'aux produits finis en passant par les divers stades de produits semi-finis. Il justifie l'organisation d'un réseau logistique (cf. §1.3.3), c'est-à-dire les différents sites avec leurs ressources de production, les moyens de transports pour relier ces sites et les espaces de stockage nécessaires pour pallier les aléas et faire tampon entre deux activités successives. En bref, l'écoulement du flux physique résulte de la mise en œuvre des diverses activités de manutention et de transformation des produits quel que soit leur état.

Le flux physique est généralement considéré comme étant le plus lent des trois flux.

#### **1.4.2.3 Le flux financier**

Le flux financier concerne toute la gestion pécuniaire des entreprises : ventes des produits, achats de composants ou de matières premières, mais aussi des outils de production, de divers équipements, de la location d'entrepôts, ... et bien sûr du salaire des employés. Le flux

financier est généralement géré de façon centralisée dans l'entreprise dans le service financier ou comptabilité, en liaison toutefois avec la fonction production par les services achats et le service commercial. Sur le long terme, il correspond aussi aux investissements lourds tels que la construction de nouveaux bâtiments et de lignes de fabrication. Encore s'agit-il d'échanges avec des organismes bancaires extérieurs au réseau d'entreprises.

### 1.4.3 Le système décisionnel

Le système décisionnel requis par le SCM s'appuie sur un système d'information. Le système d'information stricto sensu est le support et la mémoire des transactions des informations (Shapiro, 1999, Dominguez et Lashkari, 2004). La *transaction* de l'information concerne l'acquisition, le transfert, le stockage et l'affichage des données. Ainsi, des tableaux de bord permettent-ils simplement d'alimenter un décideur en informations (Morana et Paché, 2000). Par contre, *l'analyse* de l'information est un élément de l'activité de prise de décision (Lecompte-Alix, 2001). Au-delà du système d'information, le système décisionnel est l'organisation par laquelle la chaîne logistique est pilotée, définissant les décideurs à tous les niveaux hiérarchiques et ce sur le court, moyen et long terme. L'organisation du système décisionnel peut répondre à différentes philosophies. Ganeshan et al. (1999) en considèrent principalement deux : i) Une chaîne logistique dirigée comme une seule entité par un membre dominant de la chaîne. C'est le cas dans le secteur de l'automobile par exemple, où l'on trouve généralement un puissant donneur d'ordres. ii) Une chaîne peut aussi être pilotée par un système de partenariats locaux entre deux entreprises. Dans tous les cas, pour qu'il soit efficace, le pilotage nécessite une bonne coordination de l'ensemble des partenaires et une réelle coopération de la part de ceux-ci (Chan et al., 2004). Le système décisionnel peut donc être centralisé ou au contraire distribué. Mais il s'agit là uniquement de cas extrêmes. Bien d'autres cas peuvent être rencontrés.

Si, jadis, la modélisation de l'environnement d'un décideur se limitait aux frontières de l'entreprise, ce n'est plus le cas avec la notion de chaîne logistique, où l'environnement du décideur s'étend sur tout ou partie de la chaîne (cf. § 1.4.5.1). De fait, les décideurs doivent aujourd'hui prendre en compte un plus grand nombre de paramètres afin d'optimiser leur décision et ainsi améliorer leur performance industrielle. Pour les aider dans leur fonction, les scientifiques ont proposé des outils d'aide à la décision, basés sur des modèles de programmation mathématique (cf. § 1.4.5.2) ou de simulation (cf. § 1.4.5.3), aujourd'hui diffusés dans des progiciels commerciaux (cf. § 1.4.5.4).

#### **Extension de la notion de niveau décisionnel au réseau d'entreprises :**

Avec l'approche globale de la gestion de la chaîne logistique, certaines notions issues de l'entreprise s'étendent désormais à la chaîne logistique.

Ainsi la notion de niveau décisionnel (cf §1.2.1) peut-elle s'appliquer à un réseau d'entreprises. Ganeshan et al. (1998) ont fait une revue de la littérature scientifique sur le SCM et ont catégorisé les problématiques abordées en fonction du niveau décisionnel.

Au niveau stratégique, on distingue quatre parties :

- La partie « Objectifs stratégiques » : il s'agit de déterminer les objectifs pour l'ensemble des parties prenantes (partenaires).
- La partie « Design », conception ou configuration : il s'agit de déterminer la structure de la chaîne (cf § 1.3.3), dans sa topologie, mais également dans la sélection des parties prenantes (choix des fournisseurs, sous-traitants, ...).

- La partie « Développement d'avantages compétitifs » : il s'agit d'analyser comment la gestion de la chaîne logistique peut développer ou améliorer la compétitivité des entreprises partenaires.
- La partie « Evolution historique » qui se focalise sur l'évolution des stratégies des entreprises en matière de chaîne logistique.

Au niveau tactique, Ganeshan et al. (1998) classent la littérature scientifique en quatre catégories :

- La partie « Développement des relations inter-entreprises », que celles-ci soient bilatérales ou multilatérales, horizontales ou verticales.
- La partie « Gestion des opérations intégrées », c'est-à-dire la gestion des activités des entreprises pour garantir l'efficacité globale de la chaîne logistique.
- La partie « Gestion des systèmes collectifs de transport et de distribution ».
- La partie « Développement de systèmes d'information » qui cherche à améliorer l'échange d'informations dans le cadre des objectifs stratégiques.

Enfin, au niveau opérationnel :

- La partie « Contrôle et gestion des stocks et des flux physiques ».
- La partie « Coordination de la planification de la production ».
- La partie « Spécification du partage des informations opérationnelles ».
- La partie « Développement d'outils de pilotage opérationnel ».

#### **1.4.4 Les performances**

La gestion de la chaîne logistique cherche à améliorer le système global de production. Pour cela, elle met en place un certain nombre d'indicateurs de performance, parfois difficiles à quantifier (Min et Zhou, 2002, Tan, 2001), comme la satisfaction du client (disponibilité, temps de réponse, efficacité du service après-vente, réception du produit avec les bonnes configurations / options, documentation jointe complète), l'amélioration de la productivité, de l'adaptabilité ou de la flexibilité de la chaîne, un meilleur partage de l'information, la gestion et le partage des risques, la diversification des produits, l'amélioration de la traçabilité, de la compétitivité... Ces indicateurs sont construits à partir du suivi de production (niveau des stocks, nombre de ruptures...).

A l'aide de ces indicateurs, les décideurs du SCM se fixent les objectifs (ou cibles) à atteindre au bout d'un certain délai.

Dans ce qui suit, les notions de « performance » et de « système de performance », dont l'objectif est d'améliorer les compétences de la chaîne, sont d'abord développées. Puis, trois principaux indicateurs de performance de la chaîne logistique sont détaillés, correspondant chacun à un type de flux : un indicateur de « coopération » en ce qui concerne la performance du flux d'information, les coûts pour le flux financier et le délai de livraison pour le flux physique (cf §1.4.4.2).

##### **1.4.4.1 Comment améliorer la performance?**

C'est en améliorant la performance globale de la chaîne que chaque entreprise pourra améliorer sa propre performance (et non l'inverse), mais cela suppose que l'entreprise se coordonne efficacement avec ses partenaires (Llerena, 2003). A ses propos, en plus de l'idée de coordination, vient se greffer la justification stratégique des chaînes logistiques, qui est d'établir entre elles un rapport gagnant-gagnant aux entreprises partenaires, quitte à accorder

des compensations aux maillons défavorisés. Mais ce système de compensation nécessite une très bonne confiance entre les acteurs de la chaîne.

Pour améliorer le système de production (ici la chaîne logistique), il faut connaître sa performance effective et déterminer une cible ou un objectif à atteindre. La première étape consiste donc à « mesurer la performance ». Plusieurs critères de performance sont envisageables, principalement ceux détaillés ci-après. Ensuite, il faut prendre des décisions de réingénierie et agir sur le système à travers des variables de décision afin de tendre vers la cible choisie.

En définitive, la mise en place d'un système de performances traduit implicitement un désir de contrôle et d'amélioration des performances, ce qui s'applique tout aussi bien au contexte de la réingénierie du système considéré qu'à son exploitation (cf. figure 1.7).

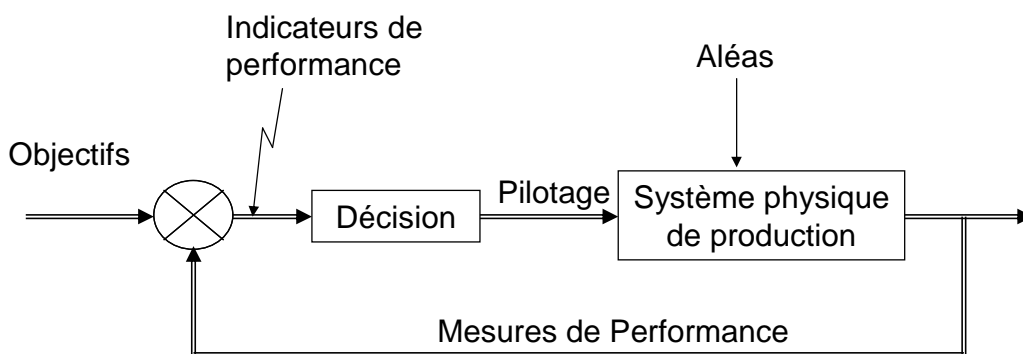


Figure 1.7 : Système d'indicateurs de performance

#### 1.4.4.1.1 Mesurer la performance

L'évaluation de la performance par un système d'indicateurs de performance est une problématique largement étudiée dans la littérature récente sur la chaîne logistique. L'objectif étant ici d'améliorer la performance de l'ensemble de la chaîne, il faut mettre en place des « mesures de performance » pour évaluer l'efficacité d'une politique de gestion de chaîne logistique.

Beamon (1998) classe celles-ci en deux catégories : les mesures de performance qualitatives (satisfaction du client, flexibilité, intégration du flux physique et d'information, gestion du risque financier,...) et quantitatives (retards de livraison, temps de réponse client,...).

Le modèle SCOR (*Supply Chain Operations Reference model*) est un modèle qualitatif, basé sur un benchmarking des modélisations de la chaîne logistique, né en 1996 lors du groupement de 69 industriels qui ont formé le *Supply Chain Council* (SCC, 1996). Ce modèle de référence, composé de quatre niveaux (cf. figures 1.8 et 1.9), décrit les processus clés présents dans chaque entreprise de la chaîne logistique, propose un certain nombre d'indicateurs de performance relatifs à chacun des processus, décrit les meilleures pratiques associées à chacun des éléments des processus et identifie les progiciels commerciaux pour les appliquer.

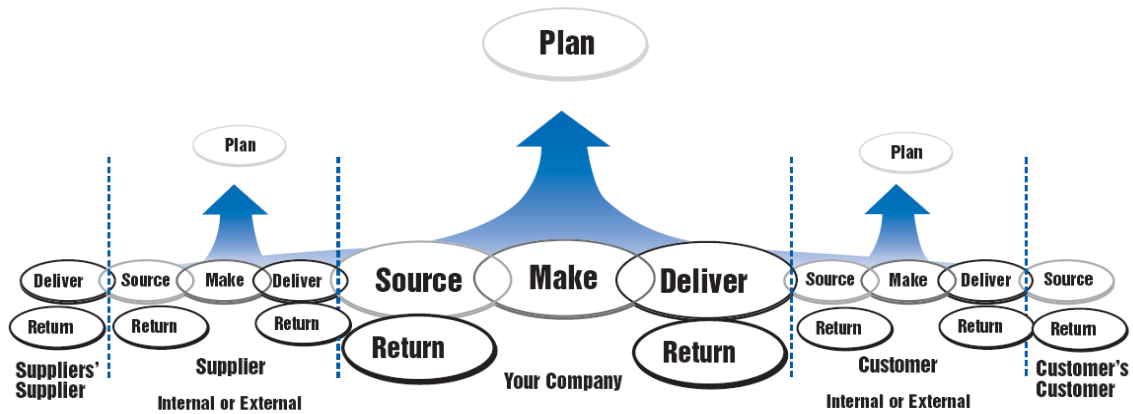


Figure 1.8 : Modèle SCOR avec ses processus, d'après SCC (1996)

|   |   | Level |   |           |  |
|---|---|-------|---|-----------|--|
|   |   | No.   | Description   | Schematic | Comments   |
| Supply Chain Operations Reference-model | ↑ | 1     | <b>Top Level</b><br>(Process Types)                         |           | Level 1 defines the scope and content for the Supply Chain Operations Reference-model<br><b>Here basis of competition performance targets are set</b>  |
|   |   | 2     | <b>Configuration Level</b><br>(Process Categories)          |           | A company's supply chain can be "configured-to-order" at Level 2 from 26 core "process categories."<br><b>Companies implement their operations strategy through the configuration they choose for their supply chain.</b>  |
|   |   | 3     | <b>Process Element Level</b><br>(Decompose Processes)       |           | Level 3 defines a company's ability to compete successfully in its chosen markets and consists of: <ul style="list-style-type: none"> <li>Process element definitions</li> <li>Process element information inputs and outputs</li> <li>Process performance metrics</li> <li>Best practices, where applicable</li> <li>System capabilities required to support best practices</li> <li>Systems/tools</li> </ul> <b>Companies "fine tune" their Operations Strategy at Level 3</b> |
|   |   | 4     | <b>Implementation Level</b><br>(Decompose Process Elements) |           | Companies implement specific supply-chain management practices at this level<br><b>Level 4 defines practices to achieve competitive advantage and to adapt to changing business conditions.</b>  |
| ↑                                       |   |       |   | ↑         |  |
| Not in Scope                            |   |       |   |           |  |

Figure 1.9 : Modèle SCOR avec les différents niveaux décisionnels, d'après SCC (1996)

Le modèle SCOR propose des indicateurs de performance (cf. tableau 1.4), mais ne précise pas s'ils sont indépendants et cohérents entre eux. De plus, il ne donne pas de méthode pour les déployer à un niveau plus détaillé (désagrégation des indicateurs).

Les principaux indicateurs de performance préconisés par SCOR sont donnés dans le tableau suivant :

| Activité / processus | Niveau Stratégique  | Niveau Tactique   | Niveau Opérationnel  |
|----------------------|---|---|--|
| Planification        | Niveau de perception de la valeur du produit par le client, variances par rapport au budget, temps de commande, coût de traitement de l'information, profit net Vs ratio de la productivité, temps de cycle total, temps total de cash flow, temps de cycle de développement du produit | Temps de requête du client, temps de cycle de développement, fiabilité des techniques de prévisions, temps de cycle du processus de planification, méthodes de réception des commandes, productivité des ressources humaines                                    | Méthodes de réception des commandes, productivité des ressources humaines  |
| Approvisionnement    |   | Performance de livraison des fournisseurs, temps de réponse des fournisseurs par rapport aux normes industrielles, prix des fournisseurs par rapport aux prix du marché, efficacité du temps de cycle des ordres d'achat, efficacité de la méthode de cash flow | Efficacité du temps de cycle des ordres d'achat, prix des fournisseurs par rapport aux prix du marché  |
| Production           | Portefeuille de produits/services   | Pourcentage de rebut, coût par heure de travail, utilisation de la capacité, utilisation des quantités économiques  | Pourcentage de rebut, coût par heure de travail, indice de productivité des ressources humaines  |
| Livraison            | Flexibilité du système de service pour répondre aux besoins du client, efficacité du plan de distribution de l'entreprise   | Flexibilité du système de service pour répondre aux besoins du client, Efficacité du plan de distribution de l'entreprise, efficacité des méthodes de facturation, pourcentage des produits finis dans le réseau, fiabilité des performances de livraison       | Qualité des produits livrés, pourcentages des produits livrés à temps, efficacité des méthodes de facturation, nombre de factures de livraison sans fautes, pourcentages des livraisons urgentes, richesse des informations nécessaires pour effectuer les livraisons, fiabilité des performances de livraison |

Tableau 1.4 : Exemples d'indicateurs de performance de la chaîne logistique

Morana et Paché (2000) proposent de regrouper ces indicateurs sous forme d'un tableau de bord dit « prospectif » afin d'aider les décideurs à prendre les meilleures décisions, surtout au niveau stratégique, grâce à une meilleure vision sur le système à piloter.

#### 1.4.4.1.2 Agir par les variables de décision

Les variables de décision sont les leviers par lesquels les décideurs de la chaîne peuvent agir afin d'optimiser les performances de la chaîne. Voici une liste non exhaustive de variables de décision généralement utilisées en SCM (Beamon, 1998) :

- le nombre de partenaires que comprend la chaîne,
- les relations clients-fournisseurs définissant les paramètres d'un « contrat »,
- le nombre de produits finis différents,
- la spécification de l'étape du processus de fabrication à partir de laquelle les produits sont différenciables,
- l'allocation d'une production à une usine (ou centre de production),
- l'allocation d'un client à un centre de distribution,
- la planification de la production et de la distribution (quantité à produire ou à livrer),
- les niveaux de stocks des composants, des produits intermédiaires et des produits finis...

Ces variables de décision sont évaluées par les décideurs qui ont la charge de gérer ou manager la chaîne logistique ou plus localement une entreprise, un site de production, un atelier, ...

### 1.4.4.2 Principaux indicateurs du SCM

#### 1.4.4.2.1 Degré de partenariat : *CO*-mmunication, -ordination, -opération, ...

Le leitmotiv de la notion de chaîne logistique est l'idée de coopération entre les entreprises d'une même chaîne. Ce sujet est largement étudié dans la littérature : Huguet (1994), Camalot (2000), Monsarrat-Despontin et al. (2005), Sepulveda et Frein (2005), Mahmoudi et al. (2006)... L'entente industrielle est un choix stratégique d'entreprises, motivé par la recherche d'avantages tels l'accroissement des compétences, la maîtrise et le partage des risques, le bénéfice d'une création de valeur. Elle permet donc une action collective et conjointe qui dépasse les limites individuelles. Divers degrés d'entente entre partenaires d'une chaîne logistique peuvent être mis en évidence. Lauras et al. (2003 – cf figure 1.10) distinguent « communication », « coordination », « coopération » et « collaboration ». Ces différents degrés de partenariat dépendent de deux facteurs :

- le type d'informations ou de traitements (résolution d'une partie ou de la totalité d'un problème) mis en commun par les partenaires,
- la façon d'échanger ou de partager ces informations entre les deux partenaires.

|   | Données       | Traitements   | Données et Traitements |
|---|---------------|---------------|------------------------|
| Echange ponctuel                            | COMMUNICATION | COLLABORATION | COLLABORATION          |
| Partage en accès libre durable              | COORDINATION  | COLLABORATION | COOPERATION            |
| Processus d'échange (régulier et formalisé) | COORDINATION  | COOPERATION   | COOPERATION            |

Figure 1.10 : Les degrés d'entente industrielle, d'après Lauras et al. (2003)

Le degré d'entente entre deux partenaires est indissociable du niveau de confiance que ceux-ci s'accordent mutuellement, car c'est généralement le souci de confidentialité des données et des savoir-faire qui limite l'optimisation possible de la chaîne (Croom et al. 2000).

Min et Zhou (2002), ainsi que Kehoe et Boughton (2001), ajoutent même que la réussite de l'intégration d'une SC dépend fortement de l'opportunité et de la qualité de l'information qui peut être partagée par les membres de la chaîne.

En définitive, la démarche de collaboration substitue au comportement de concurrence entre entreprises indépendantes un principe d'appartenance à un ensemble de partenaires formant la chaîne logistique (Lambert et Cooper, 2000). La compétition n'est donc plus inter-entreprises, mais plutôt inter-chaînes logistiques (Tan, 2001). Croom et al. (2000) voient la chaîne logistique comme un « tout » dont on cherche à optimiser les performances, afin de la rendre plus compétitive.

Thomas et Griffin (1996) étudient plus précisément la coordination entre certaines fonctions d'entreprises : la coordination acheteur-vendeur (détermination de la bonne quantité à



commander, de la taille de lots à produire), la coordination production-distribution (car ces deux fonctions sont souvent étudiées séparément et rarement simultanément) et la coordination stockage-distribution.

Néanmoins, il peut aussi exister des rapports de pouvoir entre entreprises. Par exemple, un important donneur d'ordres a un poids important dans les négociations avec ses fournisseurs. Les rapports de pouvoir peuvent aussi être inversés : pour un donneur d'ordres, un composant peut représenter une part importante du prix de revient, ou constituer un approvisionnement critique, alors que pour le fournisseur, ce donneur d'ordres ne représente qu'une petite partie de ses ventes. Dans ce cas, c'est le fournisseur qui a un pouvoir important vis-à-vis du donneur d'ordres.

#### ***1.4.4.2 La réduction des coûts***

« L'idée de la Supply Chain est née du principe que pour **limiter les gaspillages** le long de la chaîne logistique, tous les intervenants doivent travailler ensemble, en s'affranchissant des limites physiques de chaque entreprise, afin d'optimiser les processus : c'est l'entreprise étendue » (Thomas, 2003). Il faut entendre ici par « gaspillages » les coûts engendrés par des stocks surabondants, les pénalités dues aux retards de livraison, les duplications d'activités... (Tan, 2001). La réduction des coûts sur l'ensemble de la chaîne est une des principales priorités des chaînes logistiques. Par exemple, les stocks représentent pour les financiers une immobilisation de capitaux, un risque d'invendus (péremption, baisse de la demande,...), un espace de stockage immobilisé, des inventaires à faire,... Dans la chaîne logistique, les gestionnaires cherchent aussi à réduire les frais de transport en optimisant l'utilisation des moyens de transport. Les gains de productivité sont recherchés tant dans le transport que sur les sites de production, en limitant par exemple les temps improductifs de changement de série sur les équipements. Une politique de lotissement, avec détermination de séries économiques, est alors souvent envisagée.

La réduction de l'ensemble des coûts permet de réduire le prix des produits finis et ainsi de chercher à acquérir de nouvelles parts de marché, et de dégager des bénéfices pour de futurs investissements dans la chaîne logistique.

#### ***1.4.4.3 La réduction du délai de livraison***

Dans le contexte du marché mondialisé et du regroupement des entreprises sous forme de chaînes logistiques, « ce n'est pas la lutte du « fort contre le faible » mais plutôt celle du « rapide contre le lent » » (Thomas, 2003). En effet, une entreprise doit réagir au plus vite face aux variations du marché afin d'en tirer des bénéfices. Ainsi, l'objectif principal de Caterpillar (Dany, 2003) était-il de produire et livrer les produits à ses clients en 3 semaines en 2006 contre 8 semaines en 2000, ainsi que de réduire le délai de traitement des commandes (saisie, calcul des OF, ...) à une semaine contre 8 semaines en 2000 (cf. figure 1.11). Comme la production est déclenchée par les commandes (à cause des options sur les produits), le délai de production résulte des délais d'assemblage, de tests, de peinture et de transport au client. Caterpillar cherche aussi à réduire d'autres délais (11 semaines contre 44 semaines en 2000), mais qui se font en temps masqué par rapport au délai vu par le client. Par exemple, le délai dit « Supply Chain » correspond à toute la production de composants standards amont chez les différents fournisseurs. Des stocks de composants offrent un point de découplage (cf. tableau 1 §1.1.1.3) dans la fabrication des produits, et les demandes fermes des clients déclenchent la production à partir de ces stocks.

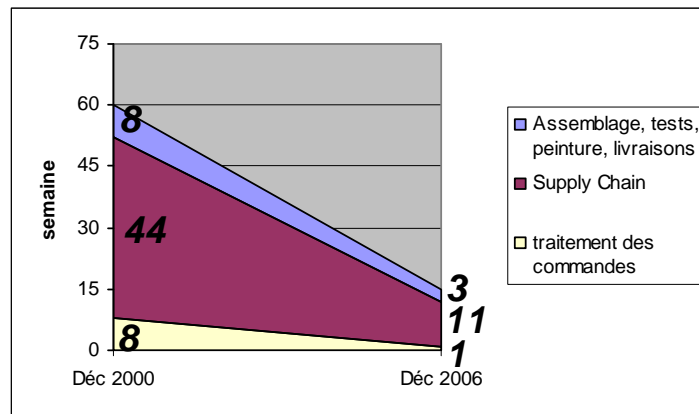


Figure 1.11 : L'objectif de réduction des délais chez Caterpillar, d'après Dany (2003)

### 1.4.5 Modélisation de la gestion de la chaîne logistique

Pour aider les décideurs du SCM, des outils ont été développés par la recherche et transférés par l'offre logicielle. Il s'agit, d'une part, de la modélisation d'entreprise pour comprendre le positionnement des activités dans les processus d'entreprise et, d'autre part, des modèles mathématiques et de résolution optimale, supports en particulier à la planification.

#### 1.4.5.1 Modélisation d'entreprise

L'essor de la modélisation d'entreprise remonte aux années 1990 (Botta-Genoulaz, 2005). L'objectif de la modélisation d'entreprise est de représenter une partie donnée de l'entreprise pour en comprendre son fonctionnement, pour en analyser son comportement et ses performances, pour détecter des dysfonctionnements, en vue naturellement d'en améliorer la performance, ou de valider une organisation nouvelle.

Selon Ganeshan et al. (1999), la modélisation d'entreprise regroupe la part « concepts et modèles non quantitatifs » de la littérature scientifique. Croom et al. (2000) classe la modélisation d'entreprise dans les modèles descriptifs et non normatifs, Min et Zhou (2002) dans les modèles qualitatifs.

La modélisation d'entreprise utilise des formalismes de modélisation générique, tels que la grille et les réseaux GRAI (Doumeingts, 1998), CIM-OSA, PERA, ARIS, GERAM, SCOR (SCC, 1996) ...

La multitude de ces modèles est parfois problématique pour définir d'une manière unifiée le fonctionnement d'une entreprise. Dans sa thèse, Roque (2005) propose un méta-modèle qui permet d'intégrer différentes modélisations par décomposition puis recombinaison de composants élémentaires présents dans ces modélisations. Ce méta-modèle permet d'échanger plus facilement des informations entre les modèles : c'est une forme d'interopérabilité entre les différentes modélisations d'entreprises.

En général, ces modèles sont centrés ou focalisés sur une entreprise, plutôt que les chaînes logistiques.

### 1.4.5.2 Les modèles analytiques

Les modèles analytiques permettent de décrire un système par un ensemble d'équations régissant son fonctionnement. Ils peuvent être déterministes (tous les paramètres du modèle sont réputés connus) ou stochastiques (certains paramètres sont incertains et suivent une loi de probabilité) (Maria, 1997). Ces modèles sont généralement associés à un problème d'optimisation à un ou plusieurs critères. Ils peuvent être résolus par différents logiciels spécifiques ou génériques.

Ces modèles correspondent à ce que Ganeshan et al. (1999) appellent les modèles quantitatifs. D'après Thomas et Griffin (1996) qui ont fait un classement des modèles mathématiques utilisés pour le SCM, les grandes familles de modèles sont les modèles stochastiques (modélisation par files d'attente, par exemple), les modèles analytiques (programmation linéaire, par exemple), et les simulations. En réalité, les modèles analytiques peuvent être stochastiques ou non, c'est pourquoi nous préférons ne conserver, dans cette classification des modèles, que les modèles analytiques et les modèles de simulation (présentés dans le paragraphe suivant).

Huang et al. (2003) précisent que le choix du modèle, compte tenu de ses hypothèses de validité, détermine directement le type de problème et de structure que l'on peut étudier. Il rappelle aussi que, pour qu'un modèle analytique (déterministe ou stochastique) soit viable, il doit être relativement simple, c'est-à-dire qu'il faut faire un certain nombre d'hypothèses et de simplifications. Ainsi les modèles analytiques se contentent-ils généralement d'aspects basés sur le processus de distribution dans une structure dyadique (une seule relation client-fournisseur). Mais cette configuration est trop simple vis-à-vis des véritables chaînes logistiques.

Thomas et Griffin (1996) classent les modèles analytiques suivant deux niveaux hiérarchiques : opérationnel et stratégique. Les problèmes soulevés dans ces modèles au niveau opérationnel sont la gestion d'une ressource avec file d'attente, la gestion du transport, l'utilisation ou non de la sous-traitance, la gestion de la production locale ou au contraire 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... Thomas et Griffin (1996) concluent que la plupart des recherches récentes se focalisent sur les modèles stochastiques.

*Remarque : L'approche retenue pour ce travail de thèse est le développement d'un modèle analytique déterministe de SCM, afin d'offrir un outil d'aide à la décision. Une étude bibliographique plus avancée sur ce type de modèle est présentée au début du chapitre 3.*



### 1.4.5.3 Les modèles de simulation

Un modèle de simulation est généralement utilisé lorsqu'il est difficile de trouver une relation (une équation) entre différentes variables et ne pouvant donc généralement pas se mettre sous la forme d'un modèle analytique.

Maria (1997) distingue aussi un autre critère pour le classement des modèles : la prise en compte du temps. Il y aurait donc deux types de modèles : les modèles statiques dans lesquels le temps n'est pas pris en compte, et les modèles dynamiques. Les modèles de simulation sont en définitive des modèles à la fois stochastiques et dynamiques.

Enfin, Kleijnen (2005) identifie quatre types de simulations : Simulation de type Tableur, Dynamiques des systèmes, Simulation à événements discrets, et Jeux d'entreprises. Il mène une étude comparative pour mettre en évidence l'intérêt de vérifier et valider les modèles (méthodes statistiques), pour analyser la sensibilité des facteurs, optimiser les modèles, et étudier leur robustesse.

#### 1.4.5.4 L'offre logicielle

Des logiciels ont d'abord été développés pour exécuter certaines tâches administratives répétitives, puis pour pallier les problèmes de communication dans l'entreprise. Ensuite, de multiples applications informatiques ont été développées dans divers domaines industriels : GPAO, supervision d'ateliers, stockage automatisé, contrôle statistique des opérations, développement produit, conception, dessin assisté par ordinateur,... 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 l'entreprise une image unifiée (basée sur un système d'information), intègre, cohérente et homogène de l'ensemble des informations dont ils ont besoin (Botta-Genoulaz, 2005 et Botta-Genoulaz et al., 2004). 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 à 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.

D'autres progiciels spécialisés et dédiés à la gestion de la chaîne logistique, gravitant toujours autour des ERP, ont été développés (voir figure 1.12) : 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 (Echanges de Données Informatisées – *Electronic Data Interchange*) sont des logiciels dédiés qui assurent une communication entre ces logiciels. Un EDI permet de partager des informations et notamment le carnet de commande qui peut directement être transmis aux autres éléments de la chaîne logistique. Ceci permet de réduire le temps de transfert de l'information et donc de réduire le temps de cycle total (Tan, 2001).

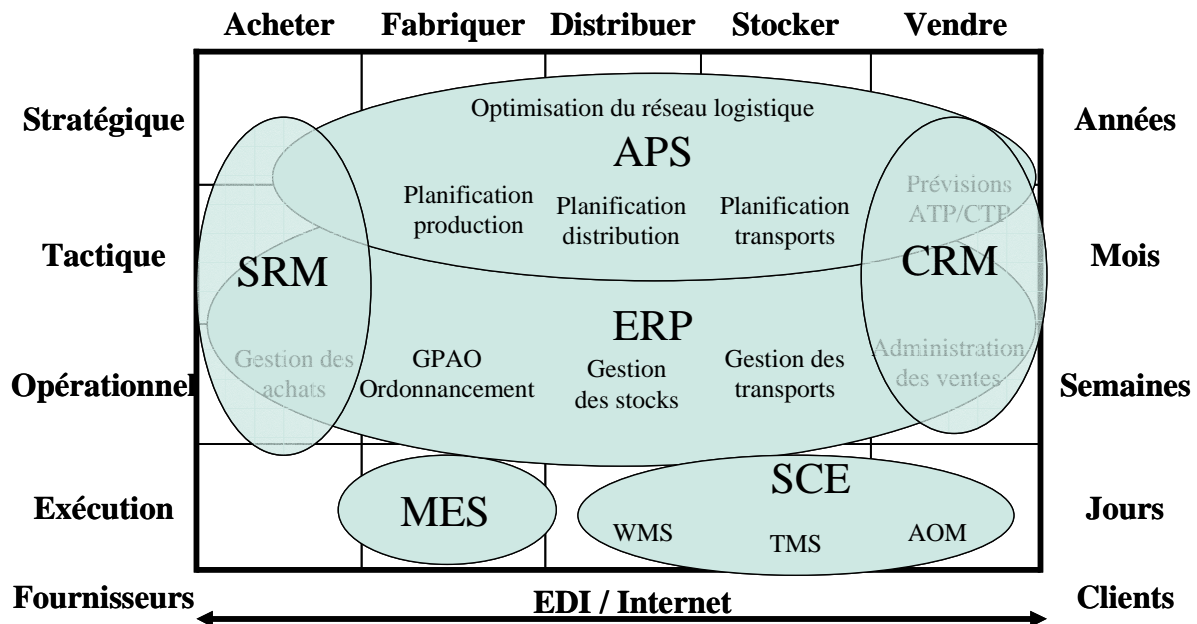


Figure 1.12 : L'offre logicielle du SCM, d'après Botta-Genoulaz (2003)

Face à un tel foisonnement de progiciels et d'éditeurs (SAP, Peoplesoft, JD Edwards, Baan, Oracle, Siebel, Manugistics, I2 Technologies, Adexa, Agilitys, Aspen Tech, Logility...), 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, 2005). Par ailleurs, une étude dans une entreprise multinationale montre que les principes de base de la chaîne logistique ne sont pas encore bien ancrés dans les esprits des managers (Morana et Paché, 2000)...

## 1.5 La littérature scientifique de la gestion de la chaîne logistique

### 1.5.1 L'abondance des publications

Le nombre de publications (conférences et revues) comportant « Supply Chain » dans leur titre ne cesse d'augmenter avec une accélération depuis 2000, comme l'indique la figure 1.13 (Botta-Genoulaz, 2005).

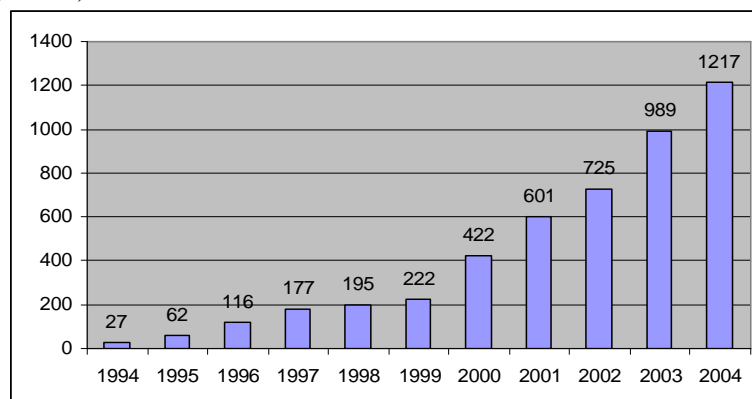


Figure 1.13 : Evolution du nombre de publication sur la SC, d'après Botta-Genoulaz (2005)

De nouveaux domaines naissent avec les nouvelles technologies. Ainsi, le e-SCM correspond à l'interaction du SCM et d'Internet. Le nombre de publications dans ce seul domaine a aussi explosé depuis l'an 2000 comme l'indique le tableau 1.5, issu de Giménez et Lourenço (2004).

| TOPIC                                     | 1995-1999 | 2000-2003 | TOTAL     |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Customer relationship management          | 0         | 2         | 2         |
| Customer service management               | 0         | 3         | 3         |
| Demand management                         | 1         | 0         | 1         |
| e-fulfillment                             | 1         | 13        | 14        |
| Manufacturing flow management             | 0         | 4         | 4         |
| e-procurement                             | 2         | 20        | 22        |
| Product development and commercialization | 1         | 5         | 6         |
| Reverse logistics and returns             | 0         | 2         | 2         |
| Information flows                         | 3         | 8         | 11        |
| Supply Chain relationships                | 0         | 6         | 6         |
| Planning & optimization                   | 0         | 7         | 7         |
| e-SCM                                     | 1         | 6         | 7         |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>9</b>  | <b>76</b> | <b>85</b> |

*Tableau 1.5 : Evolution du nombre d'articles sur le e-SCM, d'après Giménez et Lourenço (2004)*

Et il en est de même pour la plupart des domaines du SCM, dont le nombre de publications progresse régulièrement.

### 1.5.2 Classement de la littérature

Afin de cerner les différents domaines couverts par la littérature à propos du SCM, il vient à l'esprit de classer cette littérature abondante. Plusieurs auteurs ont ainsi proposé une classification (Thomas et Griffin 1996, Huang et al., 2003, Croom et al., 2000, Tan, 2001, Kleijnen, 2005). Par exemple, Croom et al. (2000) classent les publications suivant deux dimensions : d'une part les travaux théoriques ou empiriques, et d'autre part les travaux normatifs (formels) ou descriptifs. Le tableau 1.6 donne les résultats qu'ils ont obtenus sur plus de 300 articles lus. Ils concluent sur le manque de travaux théoriques.

|           | Prescriptif | Descriptif |
|-----------|-------------|------------|
| Théorique | 6%          | 11%        |
| Empirique | 27%         | 56%        |

*Tableau 1.6 : Classement de la littérature selon Croom et al. (2000)*

Nous avons participé nous-mêmes en tant que membre du groupe SCMIIP à l'élaboration d'une synthèse de ces classifications sous forme de grille (cf. figure 1.14 – Galasso et al., 2005), faisant un bilan des domaines du SCM avec un intérêt particulier sur les modèles théoriques. Cette grille croise divers critères de classement regroupés en quatre grandes catégories : identification de l'article, définition du cadre de l'étude, définition du modèle et de son utilisation (cf. § 1.4.5) et définition des échanges d'informations et de leur périodicité (cf. § 1.4.4.1.1).

La première catégorie permet simplement d'identifier l'article traité (premier critère) et de le classer suivant le type d'ouvrage (rapport de thèse, publication dans un journal, ...) et le type de publication.

La seconde catégorie reconnaît les sujets précis abordés dans l'article suivant quatre critères : les niveaux décisionnels (cf. § 1.4.3), les processus (cf. § 1.2.3), les points de vue de l'auteur sur la SCM, et les structures de la chaîne étudiée dans l'article (cf. § 1.3.3). Plus précisément concernant les « regards » de l'auteur, il s'agit des grandes problématiques couvertes par le SCM dont la plupart ont été recensées dans le tableau 1.7 de Huang et al. (2003) en fonction du niveau hiérarchique (ou décisionnel) et de la structure physique de la chaîne étudiée.

|              | Dyadique / série       | Divergent   | Convergent                      | Réseau   |
|--------------|------------------------|---|---------------------------------|--|
| Stratégique  | Détermination des prix | Ajournement, gestion des retards                  | Allocation de capacité          | Positionnement des installations                 |
| Tactique     | Stock de sécurité      | Stock de sécurité et planification des livraisons | Planification des besoins       | Planification de la production et des transports |
| Opérationnel | Ordonnancement         | Allocation des stocks                             | Ordonnancement de la production | Tournée de véhicules                             |

*Tableau 1.7 : Classement des problématiques en SCM, d'après Huang et al. (2003)*

La gestion des transports (tournée de véhicules) par exemple est plutôt une problématique située aux niveaux opérationnel et tactique (optimisation du parcours d'un camion, détermination du nombre de camions pour effectuer la tournée, recherche du trajet optimal permettant l'exécution d'une tournée au moindre coût...). Récemment, Khouider et al. (2006), Anciaux et Mirdamadi (2006), Ballot et Fontane (2006) ont proposé de piloter l'ensemble des activités de la chaîne logistique par la maîtrise des transports. Par ailleurs, les aspects humain et sociologique ne peuvent être négligés du fait que les décisions sont prises par des personnes physiques d'une part et, d'autre part, parce que l'optimisation globale de la chaîne logistique nécessite une bonne entente entre ces différents décideurs (Bazet et De Terssac, 2001).

|                                  |                            |                             |                          |                        |                    |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|----------------|-----------------------------|------------------|--|--|
| <b>Aspect démographique</b>      | Titre                      | Auteur(s)                   | Journal                  | Volume                 | Année              | Livre/Recueil              | Origine géographique  | Ville                     |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Type d'ouvrage</b>            | Livre                      | Publication livre           | Publication journal      | Publication conférence | Thèse              | Rapport interne            | Presse                | www                       |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Type de publication</b>       | Contribution de recherche  | Survey                      | Typologie                | Etude de cas           | Concepts généraux  | Discussion                 | Best practices        |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Niveau de décision</b>        | Stratégique                | Tactique                    | Opérationnel             | Temps réel             |                    |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Processus</b>                 | Approvisionnement          | Production                  | Distribution             | Vente                  | Logistique inverse |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Regard</b>                    | Conception chaîne          | Planification des activités | Gestion stocks           | Gestion transports     | Gestion risques    | Evaluation de performances | Système d'information | Modélisation d'entreprise | Coopération  | Aspects socio. | Aspects économ. & financier | Offre logicielle |  |  |
| <b>Structure de la chaîne</b>    | Dyadique                   | Convergente                 | Divergente               | Série                  | Réseau             | Intra-entreprise           | Inter-entreprises     |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Nature du modèle</b>          | Analytique                 | Simulation                  | Descriptif               | Centralisé             | Distribué          |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Caractéristique du modèle</b> | Déterministe               | Stochastique                | Continu                  | Discret                | Linéaire           | Non linéaire               |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Méthode utilisée</b>          | Programmation mathématique | Heuristique                 | Approche par contraintes | Théorie des jeux       | Jeux d'entreprises | Enquête                    | Simulation continue   | Simulation discrète       | Multi-agents |                |                             |                  |  |  |
| <b>Outil utilisé</b>             | Logiciel non dédié         | Logiciel spécifique         | Simulateur               | Solveur générique      | Jeux de plateau    | Jeux informatiques         | Tableur               |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Fréquence des échanges</b>    | Ponctuel                   | Partage en accès libre      | Processus d'échange      |                        |                    |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |
| <b>Nature des échanges</b>       | Données                    | Traitement                  | Données et traitements   |                        |                    |                            |                       |                           |              |                |                             |                  |  |  |

Figure 1.14 : Grille de classification des différents travaux de recherche en SCM, d'après Galasso et al. (2005)



## 1.6 Synthèse bibliographique et objectifs de la thèse

Dans le développement actuel de structures de production distribuées, la notion de « chaîne logistique » et de sa gestion implique une prise de conscience de l'ensemble des entreprises partenaires. Une entreprise ne représente qu'un seul maillon de cette chaîne.

D'après les analyses rapportées dans ce chapitre, les travaux actuels sur les chaînes logistiques portent essentiellement sur la relation entre un client et un fournisseur ou des clients et un fournisseur ou encore un client et des fournisseurs. Ces travaux cherchent à améliorer la collaboration entre les acteurs : meilleurs échanges d'informations, recherche de la meilleure quantité économique de transport, négociation du prix des produits,... Cependant, une chaîne logistique n'est pas seulement une relation dyadique ni même un ensemble de relations limitées à un ou deux rangs. Une chaîne logistique est bien souvent un réseau d'entreprises plus vaste et donc plus complexe à gérer.

Nos travaux visent à améliorer le processus décisionnel dans les chaînes logistiques complexes en comparant différentes façons de piloter le réseau d'entreprises.

Les objectifs de la thèse sont listés et détaillés ci-dessous.

- **Objectif 1 - Caractérisation et amélioration des performances de la chaîne logistique**

La vision globale d'une chaîne logistique et la collaboration des entreprises la composant permettent d'améliorer certaines performances recherchées par les industriels, comme par exemple la productivité, la tension des flux, les profits dans toutes les acceptations du terme.

Notre étude porte plus particulièrement sur *la planification des chaînes logistiques*, selon différentes hypothèses de partenariat inter-entreprises, en cherchant en particulier à approfondir les caractéristiques de *robustesse* et de *réactivité*, qui nous ont semblé recouvrir une pertinence scientifique et industrielle certaine, mais insuffisamment ou trop qualitativement définies dans la littérature. Par robustesse, nous entendons la sensibilité de la solution de planification aux incertitudes du modèle par rapport à la réalité. Par réactivité, nous entendons la capacité et la rapidité de réaction du pilotage face à un événement inattendu, tant endogène comme une panne de machine, qu'exogène comme une modification significative du carnet de commandes.

Dans notre travail de thèse, nous nous focalisons sur des performances quantifiables relatives à la planification des activités de la chaîne comme les retards de livraison, les niveaux de stock, que nous impliquons dans la fonction de coût à optimiser.

- **Objectif 2 - Analyse comparative d'architectures décisionnelles**

Du point de vue décisionnel, nous étudions et comparons, pour une même chaîne logistique, trois architectures de pilotage, intégrant la nature distribuée des activités plus ou moins coopératives selon l'architecture décisionnelle de la chaîne. Le premier scénario de pilotage s'inscrit dans des relations client-fournisseur classiques. Les deux autres répondent à une ambition plus marquée des entreprises à globaliser leur décision avec leurs partenaires dans le but d'améliorer leurs performances.

Notons que la problématique du SCM rejoint le concept émergent de l'interopérabilité des entreprises (Chen, 2005). En effet, une chaîne logistique est un exemple d'organisation coopérative visant une performance globale, en présence d'acteurs hétérogènes (les entreprises) de par leur organisation interne, les disparités technologiques, leurs pratiques commerciales,...

L'organisation décisionnelle considérée dans cette thèse se rapporte à la planification des activités d'un réseau d'entreprises travaillant à la commande.

Néanmoins, la portée de la thèse est étendue aux processus principaux (approvisionnement, production, distribution et vente) de chaque entreprise de la chaîne logistique. En référence aux processus-clé de SCOR (cf. §1.4.4.1.1), seule la logistique inverse (retour de produits) n'est pas traitée dans la thèse.

Dans ces travaux, nous supposons que la structure physique de la chaîne est connue et stable. Sur un plus long terme, il est vrai que les chaînes logistiques sont sujettes à variations structurelles (modification du partenariat) et d'organisation décisionnelle. La gestion de l'évolution des chaînes logistiques demeure hors du champ de notre travail.

- **Objectif 3 - Elaboration d'un modèle analytique générique pour la planification**

Dans notre travail, la performance de la planification est transcrite par un critère d'optimisation. Le troisième objectif de la thèse est en effet de proposer un modèle analytique qui ne prend en compte que les aspects génériques ou invariants pour la planification des activités, c'est-à-dire des données qui sont nécessaires pour la planification et qui se retrouvent dans toutes les chaînes logistiques. Ce modèle analytique de planification a vocation à être instanciable dans chaque entreprise maillon de la chaîne, voire au niveau global de la chaîne, si l'architecture de pilotage est centralisée. Selon un principe d'interopérabilité, même si chaque donnée n'est pas calculée ou évaluée de la même façon suivant le niveau, il existe dans notre modélisation un invariant sémantique de l'information échangée.

L'idée développée dans la thèse est de valider une macro-planification des activités sur toute la chaîne pour optimiser ses performances globales, puis de diffuser des cadres décisionnels cohérents vers les acteurs de la chaîne. Ainsi, les spécificités de chaque entreprise pourront-elles être traitées localement, en mettant en oeuvre des critères spécifiques et locaux de performance.

La résolution de notre modèle mathématique générique s'effectue par un solveur du marché pour déterminer les décisions à prendre (quantités à lancer en production, à commander pour les approvisionnements) pour optimiser le critère et donc les performances du système de production. Peu importe à vrai dire le solveur utilisé à chaque niveau de décision (global, local) pour la résolution du problème de planification optimale.

Le modèle générique proposé vise également à fournir aux entreprises-maillons une vue unifiée des problématiques de planification coopérative, et à améliorer l'interopérabilité des acteurs de la chaîne. Ce modèle, ici utilisé en simulation d'exploitation, peut également être utilisé en configuration de chaînes logistiques pour évaluer et valider des scénarios d'organisation.

Les solutions logicielles existantes (ERP ou APS) proposent certes des outils efficaces de traitement de l'information, mais ne sont généralement pas porteuses de modèles et de méthodes d'organisation explicites, d'où de nombreux problèmes d'implantation et d'utilisation de ces outils. Nous avons préféré développer un modèle analytique générique qui peut ensuite être implémenté dans divers logiciels d'optimisation. Enfin, nous avons été guidé par un souci de reconfigurabilité du modèle analytique pour permettre de modifier contraintes et critères de performance.

- **Objectif 4 - Analyse des chaînes croisées**

Enfin, nous nous sommes attaché à l'analyse des chaînes logistiques croisées, qui, loin de constituer un cas purement académique, est relativement courant dans la réalité industrielle. En effet, une entreprise est souvent impliquée dans plusieurs chaînes logistiques, ce qui peut générer des conflits d'objectifs et des dilemmes d'utilisation de ressources. Le pilotage de chaînes logistiques est peu étudié dans la littérature ou seulement lorsque la notion de la chaîne logistique est focalisée sur une seule entreprise et non sur une famille de produits finis. Le couplage de plusieurs chaînes logistiques pose des problématiques intéressantes, notamment sur le partage de la capacité de production du maillon commun. Ce travail de thèse étudie les différentes procédures d'échange d'informations pour la répartition d'une capacité partagée de production.

Afin de synthétiser le positionnement de ce travail de thèse dans le domaine du SCM, nous utilisons la grille de classement élaborée par SCMIP et présentée dans le paragraphe 1.5.2 (figure 1.14). Cette grille est présentée Figure 1.15 après simplification. Les cases grisées correspondent aux domaines étudiés dans la thèse et les cases en gris clair correspondent aux domaines, qui, sans être au centre de notre étude, s'y trouvent néanmoins connectés.

|                               |                       |                             |                          |                    |                           |                            |                   |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| <b>Niveau de décision</b>     | Stratégique           | Tactique                    | Opérationnel             | Temps réel         |                           |                            |                   |
| <b>Processus</b>              | Approvisionnement     | Production                  | Distribution             | Vente              | Logistique inverse        |                            |                   |
| <b>Regard</b>                 | Conception chaîne     | Planification des activités | Gestion stocks           | Gestion transports | Gestion risques           | Evaluation de performances |                   |
|                               | Système d'information | Modélisation d'entreprise   | Coopération              | Aspects socio.     | Aspects écon. & financier | Offre logicielle           |                   |
| <b>Structure de la chaîne</b> | Dyadique              | Convergente                 | Divergente               | Série              | Réseau                    | Intra-entreprise           | Inter-entreprises |
| <b>Nature du modèle</b>       | Analytique            | Simulation                  | Descriptif               | Centralisé         | Distribué                 |                            |                   |
| <b>Caractérist. du modèle</b> | Déterministe          | Stochastique                | Continu                  | Discret            | Linéaire                  | Non linéaire               |                   |
| <b>Méthode utilisée</b>       | Prog. mathématique    | Heuristique                 | Approche par contraintes | Théorie des jeux   | Simulation continue       | Simulation discrète        | ...               |
| <b>Outil utilisé</b>          | Logiciel non dédié    | Logiciel spécifique         | Simulateur               | Solveur générique  | Jeux de plateau           | Jeux informatiques         | Tableur           |
| <b>Fréquence des échanges</b> | Ponctuel              | Partage en accès libre      | Processus d'échange      |                    |                           |                            |                   |
| <b>Nature des échanges</b>    | Données               | Traitement                  | Données et traitements   |                    |                           |                            |                   |

Figure 1.15 : Positionnement du travail de thèse en référence à la grille SCMIP

Comme on le voit, la thèse se positionne donc principalement comme une contribution à l'optimisation de la macro-planification des chaînes logistiques aux niveaux tactique et opérationnel, c'est-à-dire pour des activités à court et moyen terme. Ceci va dans le sens d'une conclusion de Shapiro (1999), selon qui l'analyse au niveau tactique est sous-abordée

dans la littérature. Selon lui, l'utilisation d'outils d'optimisation à ce niveau permettrait de réduire l'ensemble des coûts d'approvisionnement d'au moins 5%. Les principaux aspects du SCM traités dans cette thèse sont :

- la coopération dans différents modes de pilotage,
- la modélisation de la planification des activités, de la gestion des stocks, des processus d'approvisionnement, de production, de distribution et de vente,
- l'évaluation de performances par l'utilisation d'un système d'indicateurs cohérents pour favoriser la comparaison des résultats de nos expérimentations, comme les niveaux de stock, de rupture...

Les expérimentations sont faites sur une chaîne logistique de topologie générale, c'est-à-dire de type réseau, et qui peut être considérée comme une organisation multi-sites intra-entreprise ou comme un réseau d'entreprises de façon à se rendre compte de l'inertie temporelle des flux drainés par une chaîne logistique.

Enfin, ce travail sur le pilotage des chaînes logistiques est motivé par la carence d'études théoriques, déficitaires par rapport aux études empiriques, identifiée dans Croom et al. (2000 - tableau 6 du § 1.5.2).

Nous rappelons que notre étude se limite aux chaînes logistiques dont les entreprises pratiquent la production à la commande. La production sur stock n'est pas étudiée car elle ne requiert pas un même degré de coopération et d'intégration entre les usines d'une chaîne logistique : elle est donc moins critique que la production à la commande qui nécessite une bonne connaissance de la demande et impose un délai de livraison plus important.

Le mémoire est organisé de la façon suivante :

- Chapitre 2 : définition des structures de pilotage destinées à optimiser le fonctionnement global du système de production distribué,
- Chapitre 3 : élaboration d'un modèle analytique générique destiné à la planification,
- Chapitre 4 : synthèse de séries d'expérimentations permettant de comparer les différentes structures de pilotage, et conclusions sur la robustesse et la réactivité de la planification,
- Chapitre 5 : résolution de conflits dans le cas d'une entreprise appartenant à plusieurs chaînes logistiques.

Enfin, après avoir conclu sur les difficultés rencontrées et sur les résultats de la thèse, nous développerons les principales perspectives ouvertes par notre modèle de planification et ses évolutions.



---

Partie 1

Modélisation pour la planification  
de chaîne logistique

---



---

## Chapitre 2

# Modélisation de l'architecture de pilotage des chaînes logistiques

---

### Sommaire :

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.1   | Introduction .....   | 56 |
| 2.1.1 | Approche systémique .....  | 57 |
| 2.1.2 | Hierarchisation .....  | 57 |
| 2.2   | Pilotage des réseaux d'entreprises : concepts fondamentaux et structuration..... | 58 |
| 2.2.1 | Définitions du pilotage et des centres de décision .....                         | 58 |
| 2.2.2 | Typologie des informations, supports à la décision .....                         | 60 |
| 2.2.3 | La temporalité dans le pilotage : la planification à horizon glissant.....       | 62 |
| 2.3   | Modélisation de l'architecture de pilotage des réseaux d'entreprises.....        | 65 |
| 2.3.1 | Concept et notations .....   | 65 |
| 2.3.2 | Architecture de pilotage multi-niveaux.....                                      | 66 |
| 2.3.3 | Généralisation à un réseau d'entreprises.....                                    | 67 |
| 2.4   | Les types d'architecture de pilotage.....  | 69 |
| 2.4.1 | Le pilotage distribué : une approche pragmatique .....                           | 70 |
| 2.4.2 | Le pilotage centralisé : une approche idéale .....                               | 72 |
| 2.4.3 | Le pilotage mixte : une approche consensuelle.....                               | 74 |
| 2.4.4 | Comparaison rapide des trois types d'architecture de pilotage.....               | 76 |
| 2.5   | Conclusion du chapitre.....  | 76 |



## 2 Modélisation de l'architecture de pilotage des chaînes logistiques

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous attachons à définir les fonctions de pilotage en nous appuyant sur les notions de système décisionnel, de système d'information et de planification à horizon glissant (§ 2.2), puis nous développons une modélisation des architectures de pilotage (§ 2.3) et présentons trois grandes familles de pilotage (§ 2.4).

Dans le premier chapitre (§ 1.4.3) l'état de l'art en matière de pilotage de chaînes logistiques révélait deux approches de pilotage diamétralement opposées : le pilotage distribué et le pilotage centralisé (Ganeshan et al., 1999). Ces deux approches sont ici plus longuement analysées. Puis nous introduisons une approche hybride (pilotage mixte) qui vise un compromis entre les avantages des approches précédentes : l'optimisation des performances de la chaîne et l'obtention d'une certaine autonomie locale.

On retrouve cette inspiration dans certains travaux, Ouzizi et al. (2005) notamment, mais à un niveau décisionnel stratégique ; en effet, ces auteurs s'intéressent aux décisions d'ouverture de sites de production, plutôt qu'à la planification des activités de ces ressources. Nous serons également amenés à proposer une approche hybride pour aborder, au chapitre 5, le cas d'une entreprise appartenant à plusieurs chaînes logistiques.

Une telle typologie de pilotage a plutôt valeur de référence et ne répond pas nécessairement à une pratique réelle. Sur le terrain, les chaînes logistiques sont par nature distribuées, s'agissant de réseaux d'entités ou d'entreprises géographiquement distinctes. De plus, les entreprises sont des entités juridiquement et économiquement indépendantes, résultant d'évolutions historiques et stratégiques dans le marché concurrentiel. Dans ces conditions, peu d'information circule entre entreprises et généralement une entreprise ne dialogue qu'avec ses clients et fournisseurs directs. Par conséquent, aucune entité ne possède l'ensemble des informations requises par une approche centralisée de pilotage. C'est pour cela que le pilotage centralisé demeure plutôt un cas d'école, sauf toutefois s'il s'agit d'une chaîne logistique interne à une compagnie multi-sites. Néanmoins, le fonctionnement de certaines chaînes tend vers une situation de pilotage centralisé, par exemple lorsqu'un donneur d'ordres important impose à tous les partenaires de la chaîne d'utiliser un système d'information commun. Dans ce cas, un premier pas est déjà franchi vers un pilotage centralisé, puisque toutes les informations sont déjà centralisées à travers une même base de données.

Dans cette thèse, le pilotage centralisé sert principalement à donner, sous certaines hypothèses, la meilleure solution d'un problème de planification : il sert de référentiel. Ce travail cherche en effet avant tout à comparer différents concepts de pilotage.

Notre approche considère par ailleurs un processus décisionnel multi-niveaux. Par rapport au MRP2 qui constitue, avec une phase de planification puis une phase d'ordonnancement, une pratique classique de planification dans les entreprises, nous nous intéressons aux architectures décisionnelles multi-niveaux sans rupture de modélisation d'un niveau à l'autre, qui procèdent par désagrégation pour affiner la macro-planification d'un niveau supérieur (global) au niveau inférieur (local). Cette approche, itérative et récursive, permet d'utiliser le même modèle à différents niveaux, mais avec un paramétrage de plus en plus fin (Lecompte-Alix, 2001).

Avant d'aborder la modélisation du système de pilotage, nous rappelons au préalable quelques concepts fondamentaux concernant l'organisation et la structure d'un système complexe : d'une part l'approche systémique et d'autre part la notion de hiérarchisation.

### 2.1.1 Approche systémique

La systémique postule que tout système tire ses fonctions de l'interrelation de composants distincts (ou sous-systèmes), ces sous-systèmes pouvant être à leur tour et récursivement décomposés en sous-systèmes correspondant à un niveau d'analyse plus fin. Ceci s'applique en effet dans le domaine de la gestion d'entreprise, où l'organisation du système à piloter est décomposable en sous-systèmes de plus en plus élémentaires (Pujo et Kieffer, 2002), dont les interrelations sont décrits au moyen de flux : flux de matière, d'information, monétaires, etc. L'architecture de pilotage du système de production, elle-même hiérarchisée, est à l'image du système piloté.

### 2.1.2 Hiérarchisation

Pour piloter un système complexe de production, le système de décision est décomposé en sous-systèmes, organisés en *centres de décision*. Cette décomposition est généralement effectuée :

- par fonctions (approvisionnement, production, commercial, ...),
- par niveaux de globalité et horizon des décisions, ce qui pour une fonction donnée correspond à une organisation hiérarchique du système de décision.

Ainsi, l'organisation du pilotage d'un système de production complexe répond-elle aux principes de la commande hiérarchisée, telle que pratiquée par les automaticiens. La figure 2.1 illustre ce type d'organisation, s'agissant de piloter une usine composée de deux ateliers (sous-systèmes opérants n°1 et n°2).

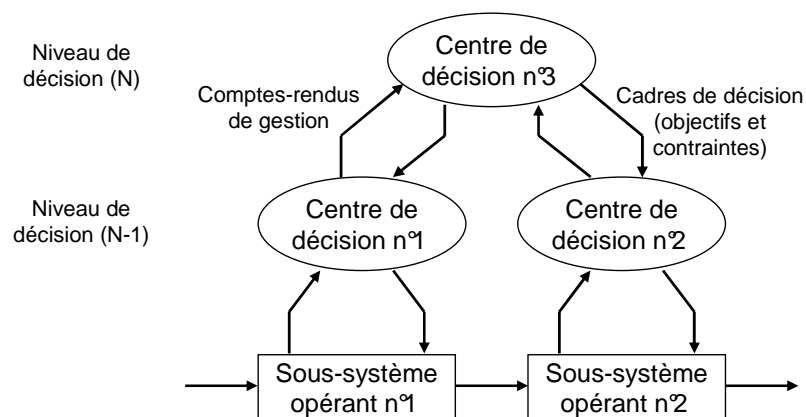


Figure 2.1 : Pilotage hiérarchisé d'un système de production (Pujo et Kieffer, 2002)

Dans un système de décision hiérarchisé, les centres de décision du niveau le plus proche du système opérant pilotent chacun une partie de ce dernier. Ils rendent compte de leur mission au centre de décision de niveau immédiatement supérieur, qui les coordonne entre eux. La coordination s'exprime par l'émission par le centre de décision coordinateur d'un *cadre de décision* vers chaque centre de décision aval. Un cadre de décision énonce les objectifs à

poursuivre et un jeu de contraintes à respecter. C'est tout l'intérêt d'un système de pilotage multi-niveaux que de procurer à un centre de décision supérieur une vue agrégée du système à piloter (un réseau d'entreprises par exemple), lui permettant de coordonner les différentes sous-parties sans devoir connaître le détail de leur activité.

## **2.2 Pilotage des réseaux d'entreprises : concepts fondamentaux et structuration**

### **2.2.1 Définitions du pilotage et des centres de décision**

Le pilotage d'un réseau d'entreprises est une fonction qui permet d'exploiter les ressources qui sont à disposition dans le réseau. Cette fonction trouve sa matérialisation dans deux éléments d'organisation : le système d'information et le système décisionnel.

Le système d'information permet de stocker, adapter et mettre à disposition les données sur lesquelles se basent les centres de décision. Le rôle du système d'information est de fournir à chaque centre de décision l'information nécessaire et suffisante à une prise de décision adéquate. Certaines informations doivent subir des agrégations et filtrages successifs qui les mettront en adéquation avec les besoins du niveau décisionnel destinataire, comme par exemple des prévisions sur la semaine ou sur le mois. Ces opérations d'agrégation d'information sont menées soit par l'entité émettrice, soit par l'entité réceptrice.

Le système décisionnel représente quant à lui l'ensemble des ressources intelligentes (acteurs humains et outils d'aide à la décision) intervenant dans l'exploitation de l'outil de production, ainsi que l'organisation interreliant ces ressources.

L'architecture de l'organisation du pilotage est la façon dont s'articule le système décisionnel avec le système d'information. Cette architecture permet d'identifier i) les décideurs eux-mêmes, appelés plus génériquement **centres de décision** sans préjuger du nombre des décideurs qui les constituent, ainsi que les décisions qu'ils doivent prendre selon leur rôle dans l'organisation hiérarchique ii) les relations entre les décideurs, c'est-à-dire les flux d'information entre ces décideurs.

Les décisions à prendre en gestion de la chaîne logistique sont tellement nombreuses et variées, qu'un seul centre de décision ne pourrait pas toutes les traiter. C'est pourquoi le système décisionnel est à la fois hiérarchisé (en niveau d'agrégation sémantique et temporelle) et réparti dans l'espace (délégation des décisions détaillées vers les centres opérationnels) permettant ainsi un compromis entre les besoins de coordination globale et d'autonomie locale des activités des différentes entités composant le système.

Dans Telle (2003), on décompose chaque entreprise d'une chaîne logistique en quatre agents autonomes, liés entre eux par des flux d'informations et de produits, correspondant aux principaux processus opérationnels (approvisionnement, production, distribution) et à la conduite du flux physique. Despontin-Monsarrat et al. (2005) ont quant à eux choisi de ne considérer que trois centres de décision génériques par entreprise : Gestion de Production, Service Vente et Service Achat (cf. figure 2.2).

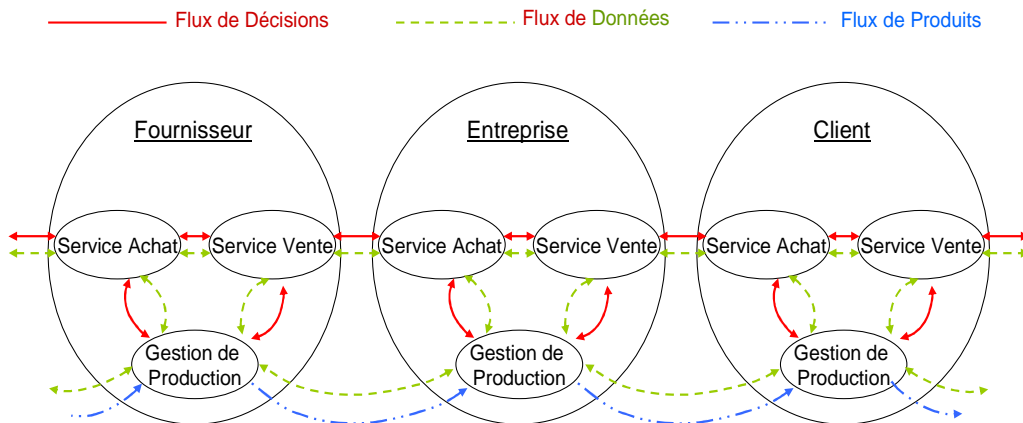


Figure 2.2 : Relations entre les centres de décision (Despontin-Monsarrat et al., 2005)

Ici, les auteurs distinguent « flux de décisions » et « flux de données ». Cependant, de notre point de vue, nous considérons qu'il y a simplement un flux d'informations entre les centres de décision. En effet, les décisions sont prises au sein de chaque centre de décision, et sont considérées comme des informations par leurs destinataires.

De plus, dans notre approche de modélisation, un centre de décision est chargé de gérer une activité ou macro-activité, selon le niveau d'abstraction considéré eu égard, non pas à une décomposition suivant les processus (approvisionnement, production, distribution, vente), mais plutôt intégrant ces processus. Ainsi, chaque entreprise qui compose une chaîne logistique est-elle représentée par un seul centre de décision. Bien entendu, il reste possible d'affiner ce point de vue à l'intérieur de l'entreprise, constituée par exemple de plusieurs lignes de production, et de considérer les centres de décision chargés de gérer les lignes de production... et ainsi de suite pour les ateliers, jusqu'aux postes de travail (cf. figure 2.3). Généralement cette décomposition récursive suit l'organisation du système physique en sous-systèmes de production chargés de fabriquer les sous-ensembles de produits. De manière générique, nous considérerons en définitive que tout moyen de production est décomposable en ressources constitutives, et ce récursivement, selon une arborescence dont les feuilles terminales sont les ressources élémentaires de production (équipements, opérateurs humains) (Lecompte-Alix, 2001).

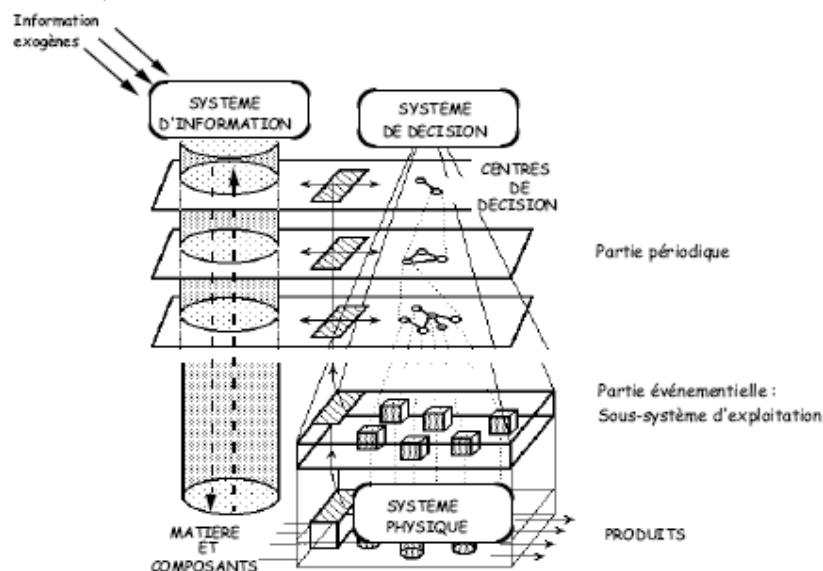


Figure 2.3 : Le modèle de référence GRAI (Doumeingts et Vallespir, 1994)

Un centre de décision est donc une entité qui pilote un ensemble de ressources opératoires (partie opérative) plus ou moins agrégées : ce sont ses **ressources internes**. En effet, quel que soit son niveau hiérarchique, un centre de décision doit allouer les activités induites par les demandes des clients ou par un centre de décision de niveau supérieur, à ses ressources internes et/ou externes (comme des sous-traitants). Pour cela, chaque centre dispose d'un **cadre de décision** structurel composé (Marcotte, 1995) :

- de données (paramètres de la décision),
- d'objectifs en terme de performances économiques et/ou productives à atteindre,
- de leviers d'action (variables de décision),
- de contraintes relatives à ses ressources internes ou à ses leviers d'action,
- et de critères à optimiser qui lient les objectifs, les leviers d'action et certaines données de la décision.

Le centre de décision utilise par ailleurs des techniques et des méthodes d'aide à la décision s'appuyant parfois sur des outils de résolution de problème (modèle de décision pour la planification).

Dans la suite, nous classons les informations traitées par un centre de décision et nous détaillons l'aspect temporel de l'activité décisionnelle.

## **2.2.2 Typologie des informations, supports à la décision**

L'ensemble des informations qu'un centre de décision reçoit constitue une partie de son cadre décisionnel. Dans ce paragraphe, nous allons classer ces informations suivant différents critères.

### **2.2.2.1 Les informations endogènes et les informations exogènes**

Les informations traitées par un centre de décision peuvent être (figure 2.4) :

- soit endogènes : ce sont i) les remontées ou les retours d'informations qui proviennent des centres de décision coordonnées par le centre considéré, ou ii) les informations propres au centre de décision lui-même, comme sa politique de gestion des stocks, son objectif de performance...
- soit exogènes : relatives à l'environnement extérieur du centre de décision, à savoir ses clients, ses fournisseurs ou sous-traitants et éventuellement les centres de décision d'un niveau supérieur.

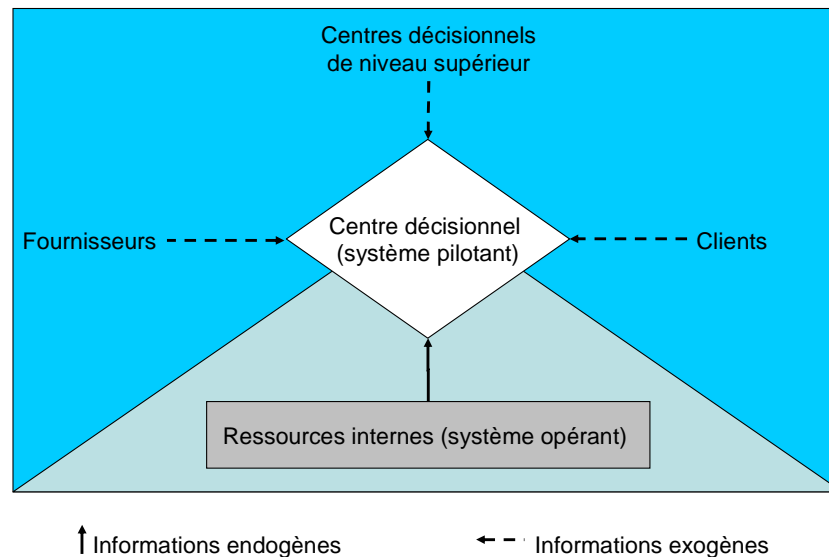


Figure.2.4 : Environnement d'un centre de décision

Les informations exogènes sont des informations extérieures au centre de décision, qui peuvent être reçues à tout moment. Elles peuvent provenir :

- des clients (ou des entreprises clients) sous forme de demandes de produits. En général, ces demandes sont regroupées par produit sur un certain horizon temporel, ce qui génère un carnet de demandes comportant au moins les informations suivantes : référence, quantité et date de livraison.
- des fournisseurs ou des sous-traitants : il peut s'agir des types de composants qu'ils peuvent fournir, leur qualité, leur prix, mais aussi du plan de livraison de ces composants ou encore de leur capacité de livraison et/ou de production.
- des centres décisionnels de niveau supérieur, sous forme d'ordre de production à réaliser.

### 2.2.2.2 La nature des informations

Les informations supports à la décision peuvent être classées suivant leur nature. Nous distinguons ici quatre types d'informations dont nous donnerons quelques exemples en rapport avec la problématique de planification :

- les données commerciales : demandes des clients et délais de livraison,
- les données techniques : gammes, nomenclatures, délais de production, capacités de production, ...
- les données financières : prix unitaire de vente, coût unitaire d'achat des composants, coût de production, coût de stockage, coût de rupture, ...
- les données sur l'état du système (suivi de production): niveaux de stock, de rupture, en-cours de production, de transport, ...
- les données relatives à la planification préalablement réalisée: plans en vigueur de production, de livraison, ...

### 2.2.2.3 La variabilité des informations

La variabilité dans le temps des informations constitue aussi un critère de classement. On peut distinguer trois classes :

- les informations considérées comme invariables à l'échelle de la dynamique de prise de décision. Il s'agit par exemple des gammes, des nomenclatures, des coûts et des capacités théoriques de production, de stockage, de transport, ... qui constituent des valeurs paramétriques pour le problème de planification.
- les informations mises à jour de façon événementielle, ayant pour origine des aléas de production (machine en panne, capacité dégradée) ou de transport. Généralement, seuls les aléas importants ne pouvant être gérés localement et/ou ayant un impact sur d'autres activités sont remontées au niveau supérieur en vue d'une replanification plus globale des activités.
- les informations mises à jour périodiquement (à chaque replanification) qui proviennent par exemple du suivi de la production pour décrire l'état du système à un instant donné : niveaux de stock, en-cours de production, de transport, ... ou visant la mise à jour des plans de production, de livraison, ...

## 2.2.3 La temporalité dans le pilotage : la planification à horizon glissant

### 2.2.3.1 Horizon et période de planification

Lorsqu'un centre de décision dispose de toutes les informations nécessaires pour poser le problème de planification, il s'attache à définir les activités futures de l'ensemble des ressources qu'il doit piloter. Cette décision porte généralement sur un certain **horizon temporel**. Cet horizon détermine la portée du plan dans le futur. La longueur de l'horizon est en règle générale fonction de l'inertie des processus pilotés et de la fréquence des événements auxquels on souhaite pouvoir réagir.

Pour détailler les plans, l'horizon est divisé en un certain nombre de **périodes élémentaires** : le temps est discrétisé. Le choix de la période élémentaire détermine la résolution du plan.

Dans le principe de l'horizon glissant, la prise de décision se fait par mise à jour périodique du plan. La **période de replanification** se définit comme l'échéance de remise en cause du plan. Le choix de la période de replanification résulte de la recherche d'un compromis entre, d'une part, une période trop longue, qui nuirait à l'adaptabilité du plan aux données contextuelles (modification/ajustement des données antérieurement considérées) et, d'autre part, une période trop courte, qui nuirait à la stabilité du système, par une réorganisation incessante des activités.

La durée de l'horizon et de la période de planification se décline en nombre de périodes élémentaires, qui constitue, par définition, l'unité de mesure du temps.

Il se peut que chaque centre de décision choisisse ses propres valeurs de la période élémentaire, de l'horizon et de la période de replanification. De ce fait, dans un réseau d'entreprises, les centres de décision travaillent généralement de manière asynchrone, ce qui

crée des délais d'attente pour la prise en compte des informations (Amrani-Zouggar et al., 2007).

Dans notre approche néanmoins, nous supposons qu'il existe déjà un certain degré de coordination dans la chaîne et nous ferons l'hypothèse que **tous les centres de décision d'un même niveau hiérarchique travaillent avec le même couple horizon/période de replanification et ce de façon synchrone** (les périodes de chaque centre sont en phase, i.e. débutent au même moment). Cela signifie que nous supposons que les transferts d'informations sont instantanés ; mais pas nécessairement leur traitement, puisque nous prenons en compte des délais d'information.

### 2.2.3.2 Réactivité des réseaux logistiques

Dans un réseau d'entreprises, la planification s'effectue généralement à **horizon glissant**. Du fait du caractère répétitif de la prise de décision en horizon glissant, un centre de décision a toujours besoin des mêmes types d'information à chaque nouvelle prise de décision. Le cadre décisionnel structurel reste ainsi inchangé, et ce n'est que l'instanciation de ces informations qui diffère à chaque période. Il s'agit donc simplement d'une actualisation d'informations dont la nature demeure invariante.

Pour piloter les activités en horizon glissant, il faut disposer d'un suivi de production pour actualiser les informations représentatives de l'état du système. Le suivi de production constitue un feed-back du système piloté vers le centre de décision, qui détecte les dérives entre les résultats réels des activités passées et les résultats ciblés par le plan de production. Le centre de décision peut ainsi mettre à jour ses données sur l'état du système de production, visualiser les écarts et les résorber en réactualisant le plan tout en intégrant les données les plus récentes : nouvelles commandes des clients et/ou prévisions de demandes (cf. figure 2.5).

Il est à noter que les informations sur le suivi de production sont souvent sujettes à un temps de latence (inclinaison des flèches pointillées sur la figure), dû à l'inertie du système d'information ou au retard de mise à jour des informations de suivi.



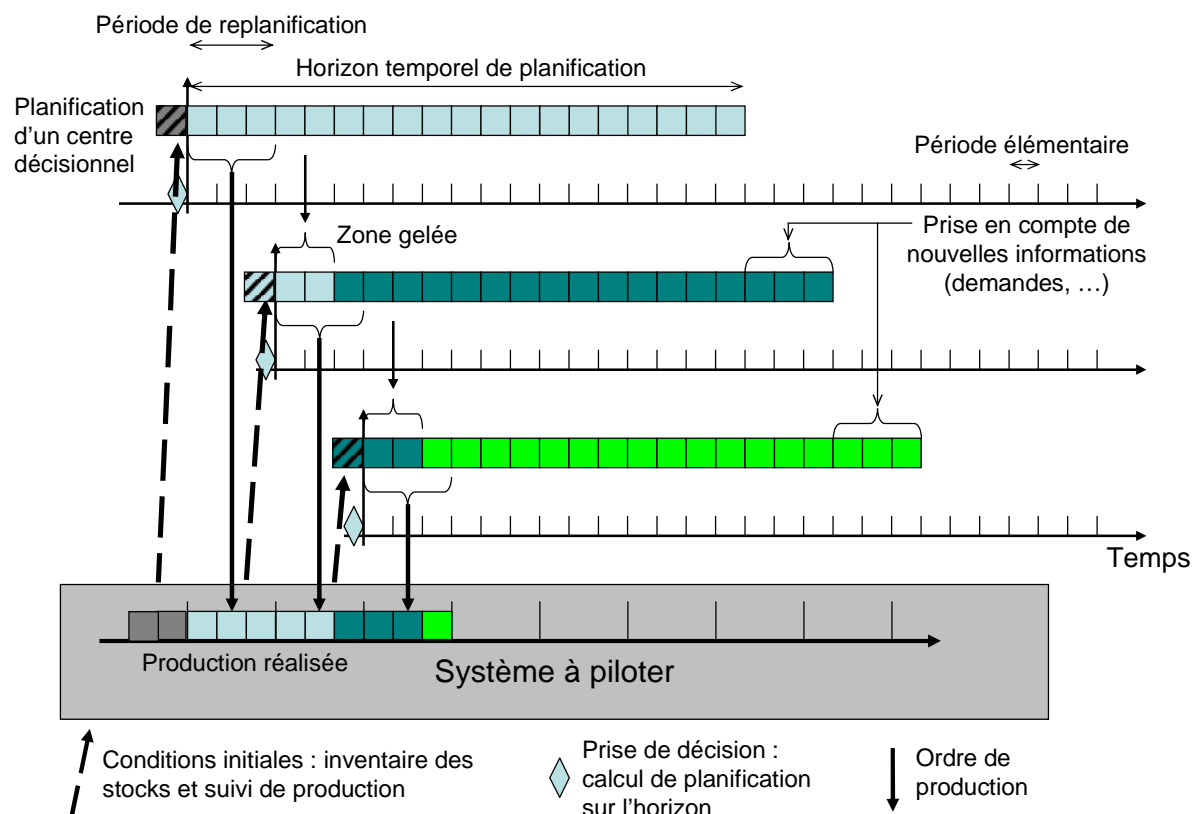


Figure 2.5 : Principe de la planification en horizon glissant

Par ailleurs, il peut exister, par rapport à l'instant de replanification (symbolisé par un losange sur la figure 2.5), une zone « gelée », c'est-à-dire une zone temporelle dans laquelle le centre de décision ne peut pas remettre en cause le plan à très court terme –qu'il serait sans doute difficile de mettre en œuvre dans un délai si court–, ce qui serait aussi un facteur d'instabilité de l'activité.

On retrouve la notion de zone gelée dans Galasso et al. (2006a et 2006b) et Galasso (2007) dans le contexte particulier de la planification des approvisionnements. Les auteurs décomposent l'horizon de planification en trois parties : horizon gelé, horizon de décision flexible et horizon de décision libre. L'horizon gelé est le futur proche où l'on s'interdit de modifier le plan. L'horizon de décision flexible définit les bornes entre lesquelles doivent se situer les quantités de composants à livrer par un fournisseur. Enfin, dans un futur plus lointain, l'horizon de décision libre est exempt de bornes de cadrage des approvisionnements. Cette approche permet de considérer la réactivité du système face à une demande flexible, en prenant en compte le caractère inertiel du système piloté.

Pour notre part, nous allons considérer, à chaque instant de replanification, une zone qui est sujette : i) à l'état du système de production à l'instant de prise de décision, c'est-à-dire aux « conditions initiales » du système et ii) aux événements passés (représentés, sur la figure 2.5, par la case hachurée avant chaque prise de décision). Cet effet « d'inertie » du système physique a en effet un impact direct sur la **réactivité** du système, c'est-à-dire la rapidité de réaction vis-à-vis d'un aléa qui, interne, peut être observé sur le système lui-même (e.g. une panne de machine), ou qui, externe, peut venir modifier le paramétrage du plan (variation de la demande, par exemple).

## 2.3 Modélisation de l'architecture de pilotage des réseaux d'entreprises

Dans cette partie, nous considérons l'architecture de pilotage d'un système de production physique. Ce concept permettra de référencer les centres de décision du système de production et de mettre en exergue les interactions possibles entre ces derniers.

### 2.3.1 Concept et notations

La structure d'un système de pilotage étant nécessairement associée à un système physique piloté, il faut tout d'abord définir ce dernier. Dans un premier temps, nous considérons une chaîne logistique constituée d'un ensemble d'activités mises en série (chaîne logistique sans branche). L'approche sera ensuite généralisée à un réseau de topologie quelconque.

Chaque activité<sup>1</sup> du système physique est référencée par un numéro  $r$  ne correspondant pas nécessairement avec son positionnement dans la chaîne. Les relations « client-fournisseur » impliquant l'activité  $r$  sont déterminées par les « ensembles des précédents et des suivants » ci-dessous :

$\bar{E}_r$  Ensemble des activités amont de l'activité  $r$

$\bar{E}_r$  Ensemble des activités aval de l'activité  $r$

Pour caractériser l'architecture de pilotage, nous commençons par référencer chaque centre de décision dans un référentiel à deux dimensions (cf. figure 2.6) :

- par le numéro du rang, dans la cascade des activités de la chaîne logistique, de l'activité pilotée,
- et par le numéro du niveau décisionnel où se situe, dans une décomposition hiérarchique, le centre de décision.

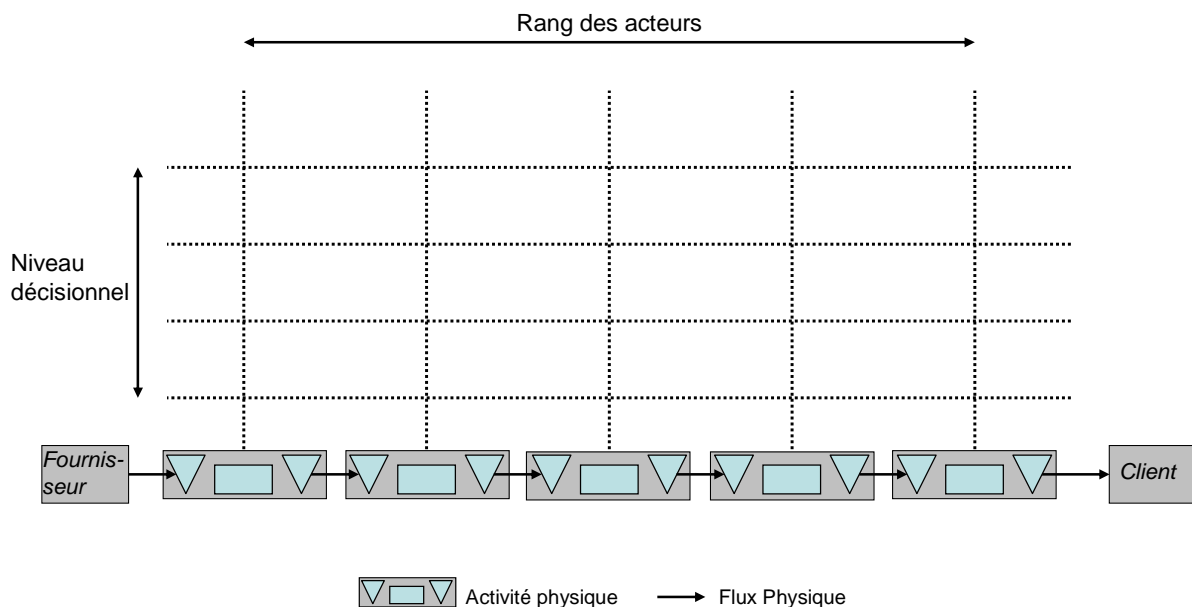


Figure 2.6 : Référencement des centres de décision

<sup>1</sup> Nous ferons l'amalgame entre activité et ressource, car dans nous considérons dans le cadre de ce travail, que l'allocation des activités aux ressources est implicite.

Chaque intersection dans ce référentiel représente un centre de décision **potentiel**. Quels que soient le rang et le niveau décisionnel, tout centre de décision est amené à prendre des décisions relatives aux activités de ses ressources internes. Entre les centres de décision circulent des informations diverses, car :

- les informations sont relatives à des activités différentes suivant le rang,
- la granularité de l'information évolue suivant le niveau hiérarchique (agrégation des données).

**L'identification d'un centre de décision au sein de l'architecture du système de pilotage détermine le niveau de pilotage, noté  $n$ , auquel il appartient et son rang dans le système, noté  $s$ . Le centre de décision ainsi défini est noté  $CD^{n,s}$ .**

Le niveau  $n = 1$  est attribué au niveau décisionnel le plus bas, c'est-à-dire le plus proche des activités physiques.

A un niveau décisionnel donné, le rang  $s$  est attribué arbitrairement : il ne correspond pas nécessairement à l'ordre des activités du flux physique.

De la même façon que pour les activités, la relation « client-fournisseur » entre centres de décision est établie par les « ensembles des précédents et des suivants » définis ci-dessous :

$\rightarrow^{n,s}$   
E Ensemble des fournisseurs en relation avec le centre de décision  $CD^{n,s}$

$\leftarrow^{n,s}$   
E Ensemble des clients en relation avec le centre de décision  $CD^{n,s}$

### 2.3.2 Architecture de pilotage multi-niveaux

Un système hiérarchisé de pilotage répond à un principe d'encapsulation des centres de décision : plus l'on monte dans les niveaux hiérarchiques et moins il y a de décideurs. A un niveau décisionnel donné, certains centres de décision peuvent être regroupés et intégrés pour former un macro centre de décision. C'est tout l'intérêt d'un système multi-niveaux : un macro centre de décision dispose d'une vue intégrée du système à piloter (un réseau d'entreprises par exemple), dont il supervise l'activité en coordonnant ses composantes. Ainsi, sur la figure 2.7, chaque activité est-elle pilotée localement au niveau atelier ( $n = 1$ ) par un centre de décision  $CD^{1,s}$  ( $s = 1, \dots, S$ ). A un niveau supérieur ( $n = 2$ ), ces activités sont regroupées en deux entreprises, dont les centres de décision sont respectivement  $CD^{2,1}$  et  $CD^{2,2}$ . Enfin, on a considéré, au niveau  $n = 3$ , un centre décisionnel qui regroupe les entreprises de la chaîne logistique entière ( $CD^{3,1}$ ).

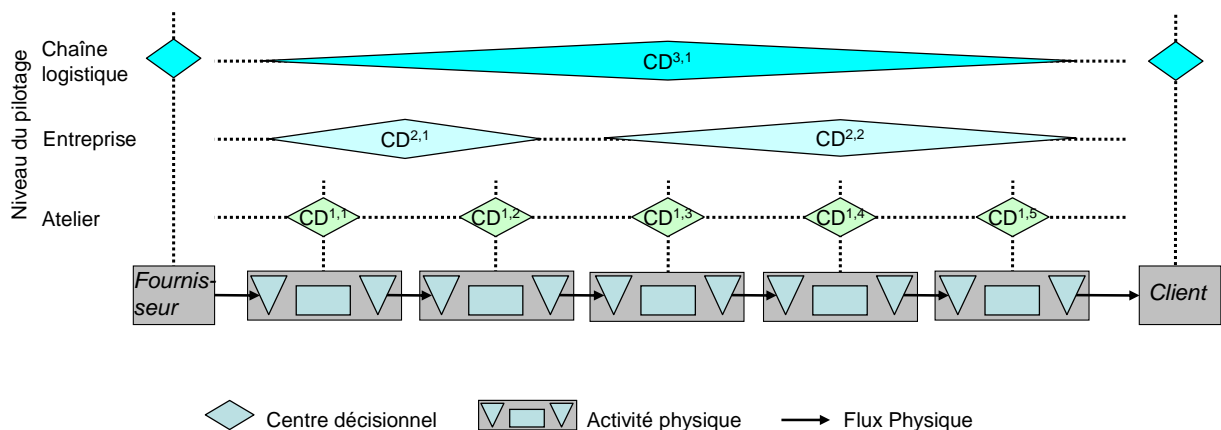


Figure 2.7 : Exemple de référencement des centres de décision

Ces regroupements étant opérés, il est alors aisé de construire le graphe reliant hiérarchiquement les centres de décision entre eux (cf. figure 2.8).

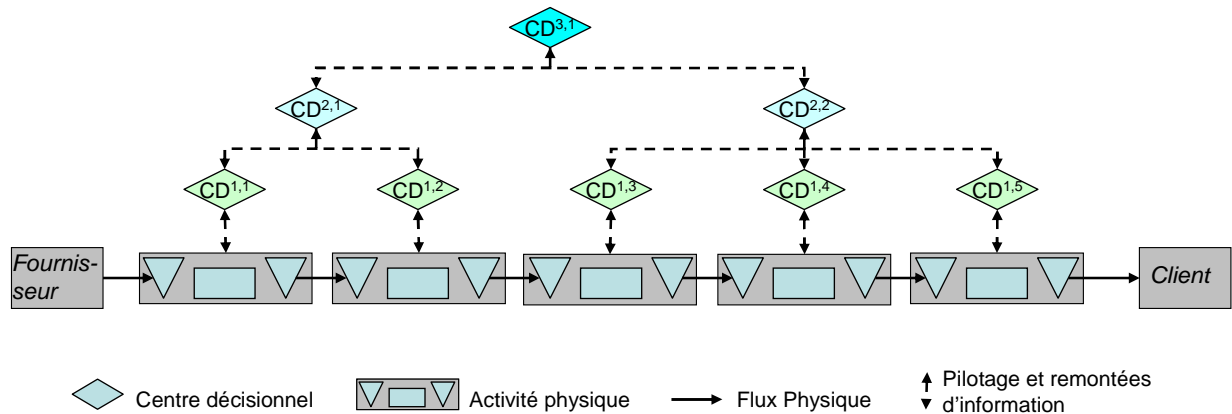


Figure 2.8 : Graphe des relations hiérarchiques entre centres de décision

Ce graphe peut être recomposé à partir des ensembles suivants :

$\hat{E}^{n,s}$  Ensemble des centres de décision de niveau supérieur ( $n+1$ ) gérant le centre de décision  $CD^{n,s}$

$\check{E}^{n,s}$  Ensemble des centres de décision de niveau inférieur ( $n-1$ ) gérés par le centre de décision  $CD^{n,s}$

### 2.3.3 Généralisation à un réseau d'entreprises

Les chaînes logistiques ont rarement une structure physique en série, mais plus généralement une structure en réseau. Cela sous-entend donc des activités en parallèle, de type hétérogène (par exemple, des fournisseurs de composants différents) ou homogène (activités transformant le produit de manière similaire). Avec ce dernier type d'activités, un problème d'allocation apparaît, qui consiste à déterminer lesquelles de ces activités homogènes seront chargées d'effectuer certains travaux. Concrètement, ces activités homogènes peuvent correspondre à :

- des fournisseurs fabriquant un même type de composant,
- des ateliers de production en parallèle pour augmenter la capacité de cette activité, au sein d'une même entreprise ou non (appel à des sous-traitants),
- des clients qui demandent les mêmes types de produit.

Le parallélisme d'activités conduit à ajouter une troisième dimension au système de référencement introduit précédemment (figure 2.7), pour arriver au référentiel tridimensionnel présenté figure 2.9.

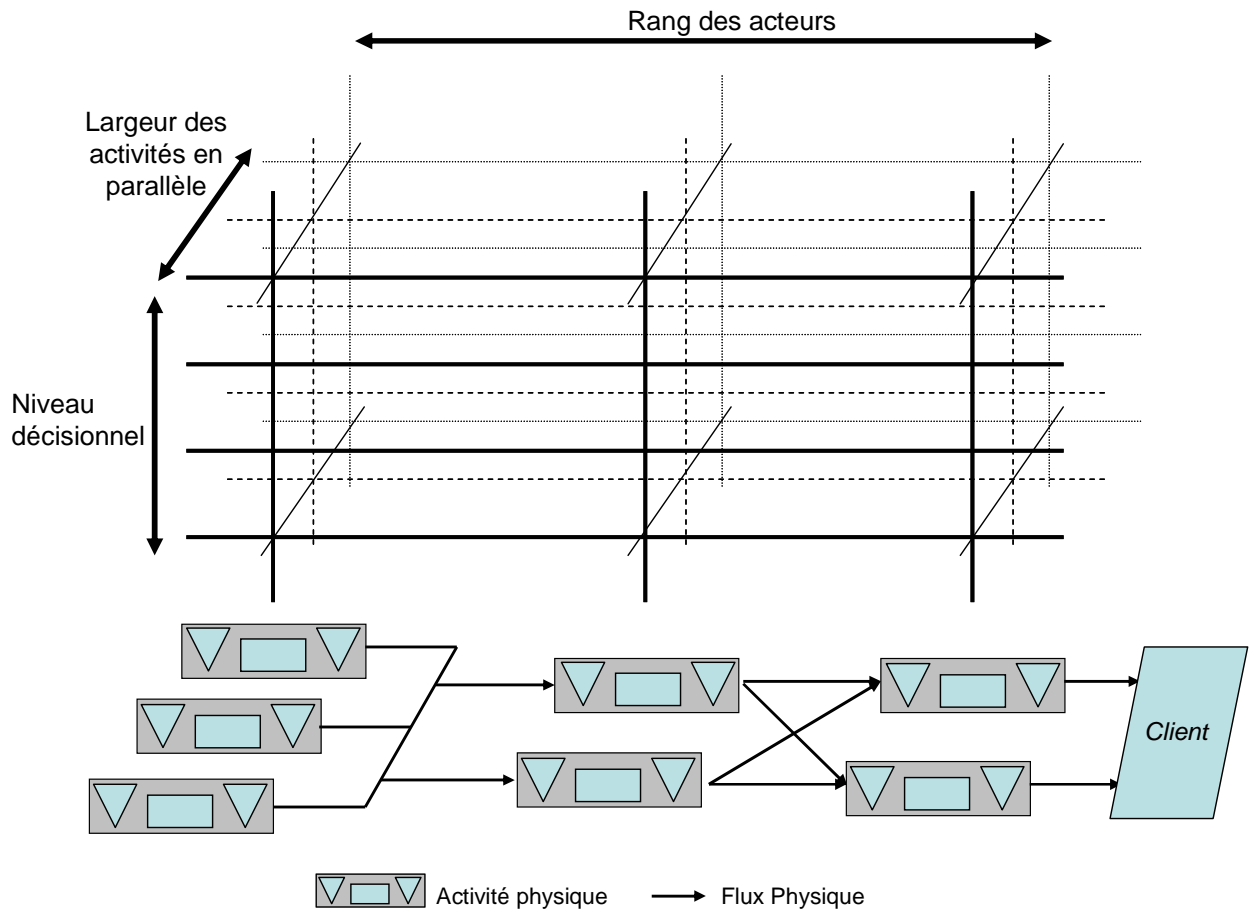


Figure 2.9 : Référencement tridimensionnel des centres de décision

Toutefois, il n'est pas nécessaire d'ajouter une troisième coordonnée pour traduire le rapport de parallélisme des centres de décision. En effet, l'indice  $s$  suffit à identifier tout centre de décision dans le plan d'un même niveau. Les ensembles des précédents et des suivants permettent ensuite de retrouver le graphe décrivant les relations entre les centres de décision d'un même niveau.

Sur l'ensemble d'un réseau d'entreprises, tout centre de décision sera donc simplement repéré par :

**$CD^{n,s}$**  avec  $n$  indiquant le niveau, et  $s$  son identifiant dans le niveau  $n$ .

Afin de repérer les relations hiérarchiques entre les centres de décision, il suffit de définir le graphe de ces relations. Ceci peut se faire en déterminant, pour chaque centre de décision, l'ensemble de ses ressources internes et de ses centres de décision de niveau supérieur. On

retrouve donc la définition des ensembles  $\hat{E}^{n,s}$  et  $\check{E}^{n,s}$ , présentés dans le cas d'un réseau en série.

En général, un centre de décision est en relation avec au plus un centre de niveau supérieur. Cependant, ce n'est pas toujours le cas, par exemple lorsqu'une entreprise est un maillon commun à plusieurs chaînes logistiques.

La figure 2.10 résume les notations permettant de caractériser l'environnement de tout centre de décision  $CD^{n,s}$ .

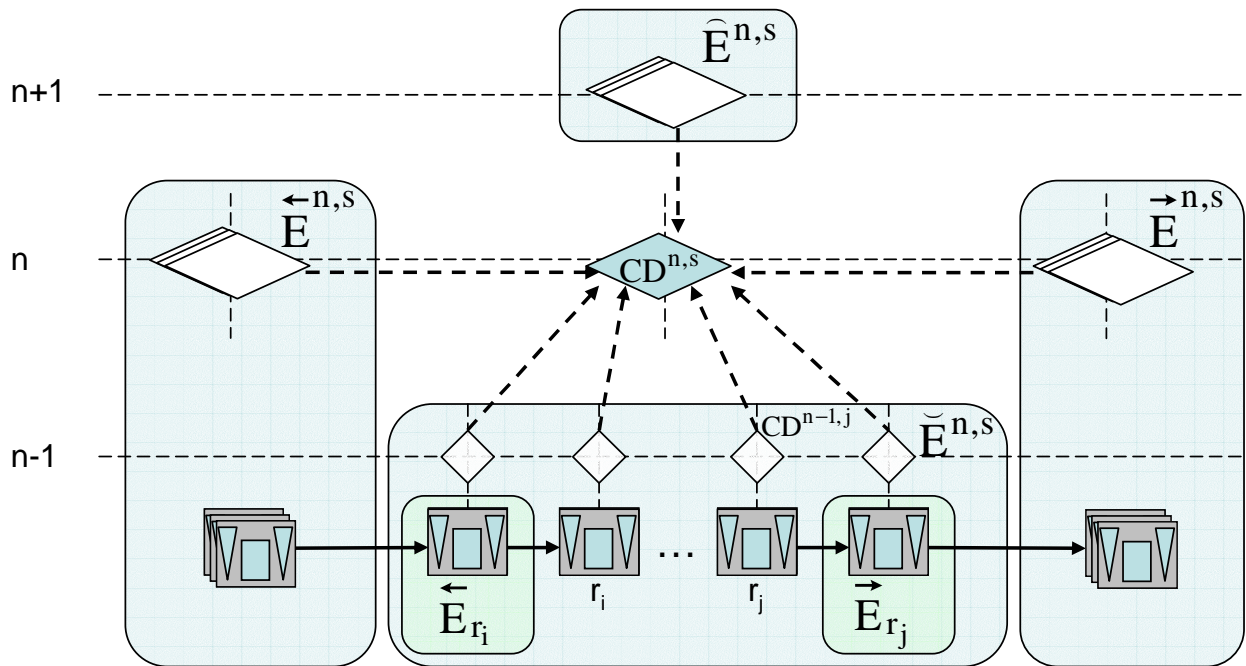


Figure 2.10 : Environnement du centre de décision  $CD^{n,s}$  (Notations générales)

Notons que, vu du centre de décision  $CD^{n,s}$ , un fournisseur est perçu comme un tout :  $CD^{n,s}$  ne distingue pas le centre de décision du fournisseur de sa ressource opérationnelle. Il en est de même pour les clients et ses ressources internes.

Ainsi,  $r \in \tilde{E}^{n,s}$  est un raccourci qui représente par exemple une des ressources  $r_j$  liée au centre de décision  $CD^{n-1,j}$ .

Par conséquent, l'ensemble des ressources  $r$  en rapport avec le centre de décision  $CD^{n,s}$  est constitué de ses fournisseurs, ses ressources internes et ses clients ( $r \in \overset{\leftarrow}{E}^{n,s} \cup \tilde{E}^{n,s} \cup \overset{\rightarrow}{E}^{n,s}$ ).

### 2.4 Les types d'architecture de pilotage

Une architecture de pilotage explicite l'organisation du processus décisionnel et des échanges d'information nécessaires à la maîtrise d'une production sur un ensemble de moyens. Différentes architectures peuvent être élaborées en tenant compte de la nécessaire cohérence (verticale) des décisions globales avec les décisions prises par les centres subordonnés et d'une recherche de cohérence (horizontale) des décisions prises localement via une coopération directe entre centres de décision de même niveau (Jayaraman et Pirkul, 2001).

Le référentiel défini au §2.3 en support à la modélisation des architecture de conduite nous permet d'identifier trois grands types d'architecture. Deux d'entre eux sont diamétralement opposés, tandis que le troisième recouvre toute une classe d'architectures hybridant les deux premiers. Ces trois architectures de pilotage, bien que présentées ici au niveau le plus bas, peuvent s'appliquer à n'importe quel niveau. Nous les présentons sur un exemple de réseau d'entreprises.

### 2.4.1 Le pilotage distribué : une approche pragmatique

Il s'agit d'une architecture de pilotage basée exclusivement sur des relations clients – fournisseurs entre entités successives. Les différents acteurs d'une chaîne échangent des informations et des produits pour satisfaire la commande du client final.

D'après le référentiel généralisé établi au §2.3.3, le pilotage distribué ne comporte qu'un seul niveau ( $n=1$ ), si l'on considère que les activités physiques sont des entreprises (il reste possible d'affiner la description de l'architecture de pilotage au sein de chaque entreprise). Dans ce type d'architecture, chaque activité est pilotée individuellement et n'interfère qu'avec les activités directement en amont et en aval du flux physique, c'est-à-dire ses fournisseurs et clients directs. La figure 2.11 explicite le pilotage distribué sur un exemple académique de réseau d'entreprises (François et al., 2005).

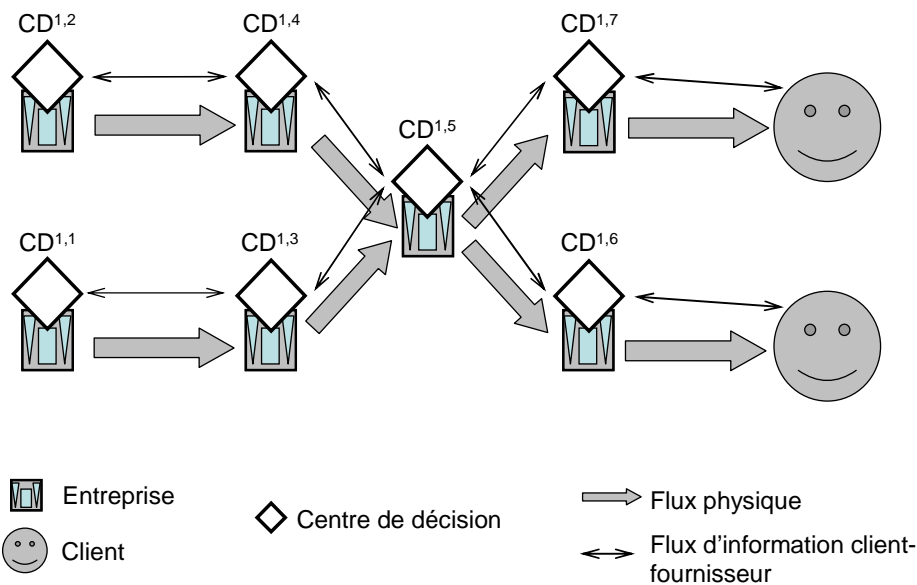


Figure 2.11 : Architecture de pilotage distribué

Considérons à présent les échanges locaux entre l'entreprise pilotée par le centre de décision CD<sup>1,4</sup> avec son fournisseur (CD<sup>1,2</sup>) et son client (CD<sup>1,5</sup>). Cette sous-chaîne focalisée sur l'entreprise CD<sup>1,4</sup>, est générique et peut être dupliquée *ad lib* au sein d'une chaîne logistique. Le client passe une commande à l'entreprise (première liaison client – fournisseur) qui calcule ses propres besoins et passe elle-même commande à son fournisseur (seconde liaison client – fournisseur). Toutes les entreprises de la chaîne effectuent leur propre calcul des besoins et l'information sur les commandes est propagée de proche en proche en remontant vers les fournisseurs de matières premières. En réponse, le flux physique mobilise des activités depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au client.

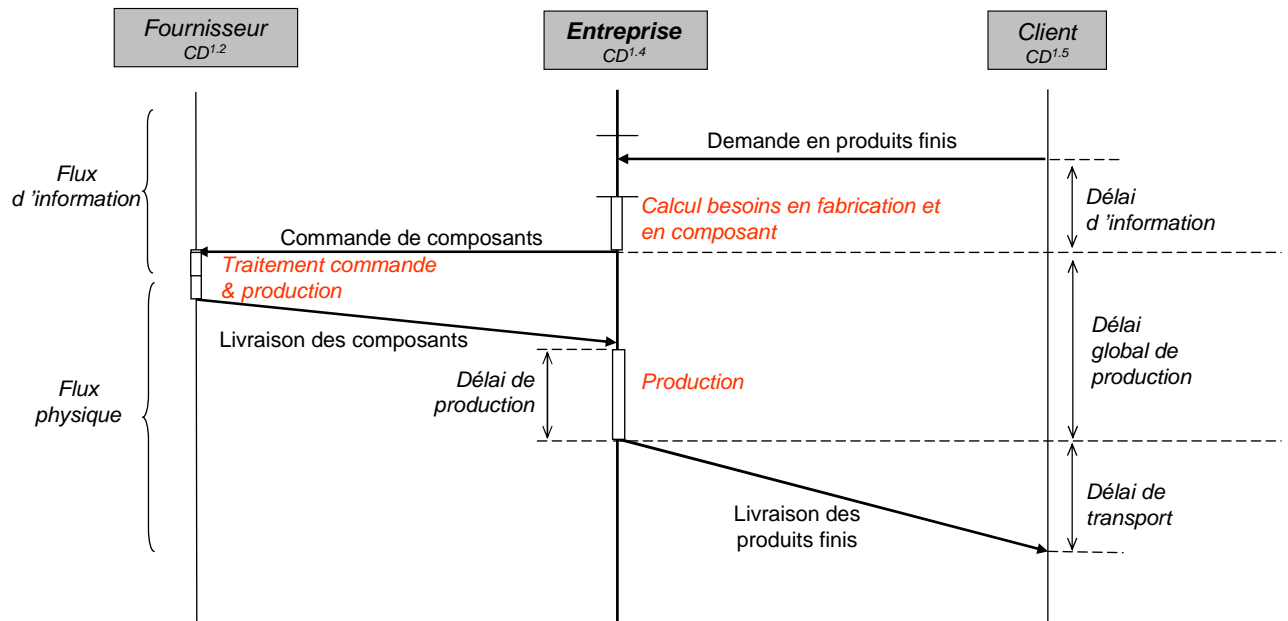


Figure 2.12 : Diagramme de séquence pour le pilotage distribué

Notons que, si un centre de décision doit planifier les activités de production de son entreprise et éventuellement gérer le transport de ses produits finis vers ses clients, il est plus rare qu'il doive aussi gérer le transport des composants depuis ses fournisseurs.

Du point de vue de la chronologie des échanges, il apparaît trois types de délais :

- Le *délai d'information* qui peut se répartir en plusieurs délais élémentaires : i) le délai de transmission de l'information, en général négligeable avec l'utilisation des technologies de l'information et de la communication par rapport aux moyens conventionnels; ii) le délai de prise en compte de l'information au sein de l'entreprise (saisie des commandes, fonctionnement périodique); et enfin iii) le délai de traitement de l'information lors de la planification de la production et des approvisionnements.
- Le *délai de transport* de la marchandise d'un fournisseur à son client (ou d'une ressource à une autre, suivant le degré de finesse), incluant les temps de chargement et de déchargement.
- Le *délai de production* correspondant à la durée de la fabrication du produit dans l'usine (ou plus généralement dans la ressource pilotée).

Le pilotage distribué étend ainsi itérativement des relations client – fournisseur généralisées à l'échelle d'une chaîne logistique. Avec une telle architecture de pilotage, chaque entreprise est totalement indépendante et peut appliquer sa propre politique de gestion. Ainsi, la prise de décision s'effectue-t-elle par rapport à des objectifs et indicateurs de performance purement locaux. Ce type d'architecture de pilotage représente la majorité des situations actuelles de gestion inter-entreprises ; sa mise œuvre est simple, mais présente le défaut d'amplifier les variations de la demande au fur et à mesure que l'on s'éloigne du client final (effet 'coup de fouet' ou effet Forrester (1961)), en cas de gestion sur stock. Ce phénomène est classiquement illustré au travers du « jeu de la bière » : quatre entités (usine, grossiste, détaillant, magasin) doivent gérer indépendamment leur stock de packs de bière en ne dialoguant, avec un certain délai d'information, qu'avec leur client et fournisseur direct, en sachant que chaque pack stocké (respectivement manquant) engendre une pénalité d'une (respectivement deux) unité(s) monétaire(s). La moindre fluctuation de la demande provoque alors la peur de ruptures de livraison et/ou du surstock, entraînant alors une mauvaise estimation des quantités à



commander auprès des fournisseurs. Le manque de visibilité globale sur la demande et une mauvaise gestion de l'incertitude en sont les principales causes.

### 2.4.2 Le pilotage centralisé : une approche idéale

Pour pallier le manque de visibilité globale des informations au sein de la chaîne logistique, une parade consiste à rendre accessibles à l'ensemble du réseau les informations connues de chaque partenaire, et à en centraliser leur traitement à des fins de gestion optimale de la chaîne logistique. Une architecture centralisée de pilotage comporte un deuxième niveau décisionnel avec un seul centre de décision (cf. figure 2.13) supervisant l'ensemble des centres de décision de premier niveau.

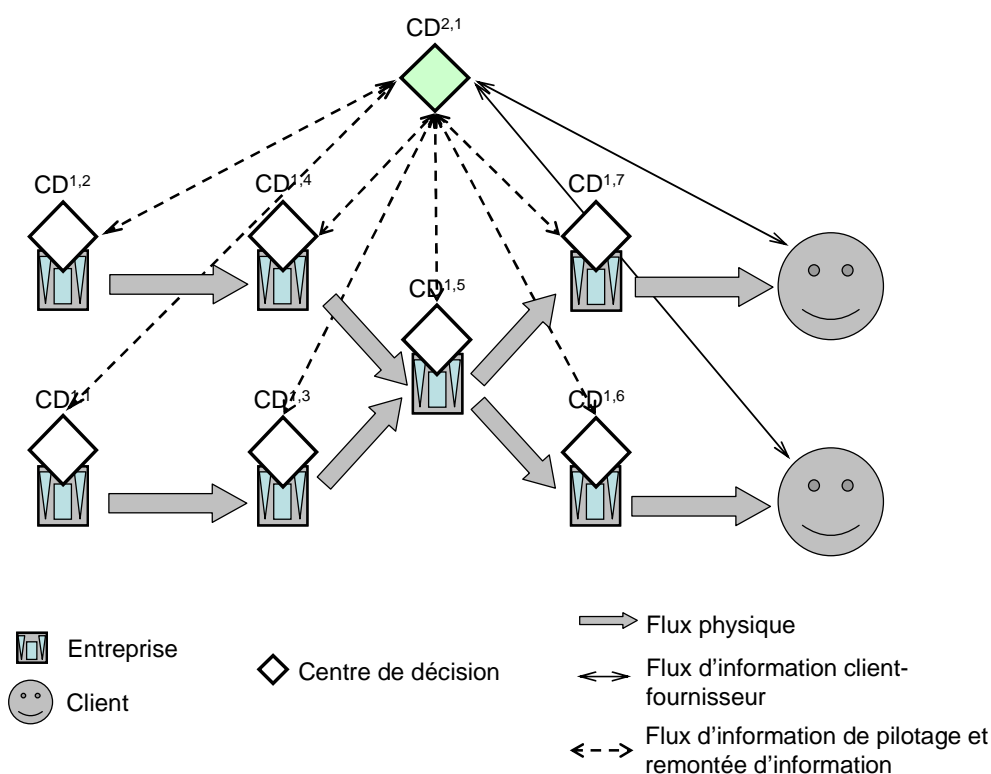


Figure 2.13 : Architecture de pilotage centralisé

Qui pilote alors le centre de décision global ?

Il existe plusieurs possibilités. Le centre de décision de niveau supérieur peut en effet être géré par :

- un acteur dominant dans la chaîne : généralement une entreprise en position de leader dans son domaine ou un important donneur d'ordres,
- un pool de décideurs issus des entreprises constituant la chaîne,
- un acteur tierce et indépendant mandaté par les entreprises partenaires de la chaîne,
- etc...

Si elle est fréquemment évoquée dans le milieu académique, l'architecture centralisée de pilotage ne semble pas, au vu de nos entretiens auprès d'industriels, correspondre à une pratique courante. Nous remarquons néanmoins qu'une telle architecture est naturelle dans le cas d'une chaîne logistique interne à une entreprise multi-sites constituant une seule et même entité juridique. Dans ce cas en effet, le partage de l'information est une nécessité et ne se heurte pas à des problèmes de confidentialité. Une architecture centralisée apporte la globalité des informations, exprimées parfois sous forme agrégée, au centre de décision supérieur et permet ainsi une coordination globale en évitant l'effet de propagation de la demande de proche en proche. Il ne devrait donc pas y avoir d'effet Forrester. Par contre, l'autonomie des maillons de la chaîne est diminuée, ce qui oblige à une certaine transparence dans la gestion des données entre les maillons et le centre de décision global.

Les informations étant centralisées, une telle architecture garantit des performances optimales dans le cas d'absence d'aléa. En présence d'aléas, il n'est pas sûr toutefois que ce pilotage soit le plus performant. Son potentiel de réactivité sera donc analysé dans le chapitre 4.

Quels sont les échanges entre les diverses entités du réseau ainsi piloté ? Considérons par exemple les rapports entre un client, le centre de décision de niveau supérieur  $CD^{2,1}$  et les ressources internes  $CD^{1,5}$  et  $CD^{1,6}$ . La figure 2.14 illustre les échanges nécessaires pour satisfaire la demande du client. Cette demande est tout d'abord transmise au centre de décision global, seul « guichet » pour les clients de la chaîne, qui planifie toutes les activités à réaliser sur l'ensemble de la chaîne, puis le centre de décision global calcule et distribue les ordres de production aux entreprises de la chaîne.

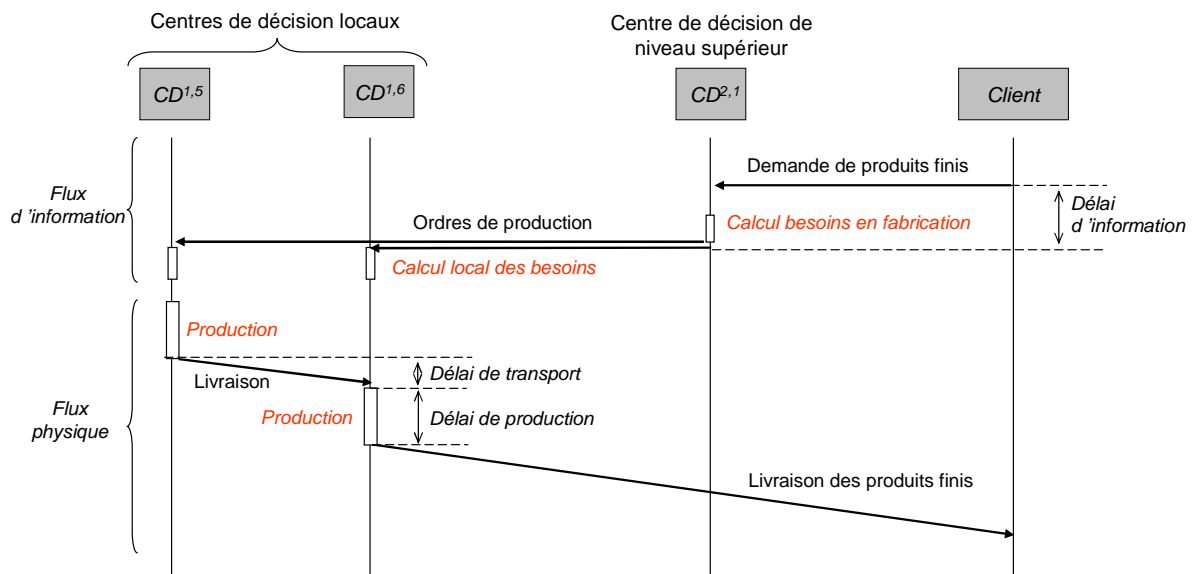


Figure 2.14 : Diagramme de séquence pour le pilotage centralisé

Dans un système multi-niveaux, le centre de décision du niveau supérieur a une vision plus large du système, et doit donc planifier non seulement les activités de production de chaque entreprise, mais aussi les activités de transport nécessaires pour acheminer les marchandises d'une entreprise à l'autre. Dans ce contexte, il est pertinent d'agréger certaines informations (temps, produits, ressources,...) mises à disposition du centre de décision supérieur, afin, d'une part, de limiter la masse des données à traiter et, d'autre part, de bénéficier d'un effet de compensation des incertitudes sur les données brutes. L'agrégation du temps se traduit par un

couple horizon/période de plus grande valeur au niveau supérieur (pilotage de la chaîne) qu'au niveau local (pilotage d'une entreprise), au risque d'ailleurs d'augmenter les délais de prise en compte de l'information... et ainsi réduire les performances de la chaîne.

Pour ce qui est de la diffusion des ordres de planification, si un système d'agrégation/désagrégation des informations est mis en place, la planification globale de la chaîne doit être affinée par une planification locale. Cette dernière permet, entre autres, de répartir la charge de manière à optimiser les objectifs propres à chaque entreprise et de réagir à de petits aléas de production.

Si aucun système d'agrégation n'est mis en place, c'est-à-dire si les planifications locales et globales sont au même niveau de granularité, alors la planification locale n'apporte rien si ce n'est la confirmation des ordres de production. Dans ce cas, l'entreprise locale n'a quasiment aucun degré d'autonomie.

En définitive, dans le pilotage centralisé, il n'y a pas de principe de propagation de la demande de proche en proche et le délai d'information n'apparaît qu'une seule fois : lorsque le client passe commande au centre de décision global. Ceci confère au pilotage centralisé une bonne réactivité aux variations de la demande. Par contre, la réactivité face à des aléas sur le flux physique n'est pas toujours très bonne, car l'information de l'aléa passe d'abord par les centres locaux avant d'être transmise au niveau supérieur, et, en retour, les décisions correctives subissent elles aussi les délais de traitement et de transmission propres à une architecture multi-niveaux ...

### 2.4.3 Le pilotage mixte : une approche consensuelle

L'architecture distribuée et l'architecture centralisée constituent des organisations 'canoniques' de pilotage, à partir desquelles toute combinaison peut être envisagée, à la recherche d'un réglage satisfaisant du dilemme optimisation globale / autonomie locale. Il s'agit alors d'architectures 'mixtes' où les unités constituant le réseau peuvent se rassembler en petits groupes pour mettre en commun informations et processus décisionnels dans le but de mieux coordonner leurs actions.

Contrairement au pilotage centralisé, qui, par définition, concentre toutes les informations dans un même centre de décision, un pilotage mixte s'appuie sur plusieurs centres de décision au niveau supérieur, dont chacun ne regroupe qu'une partie des informations de la chaîne logistique.

Nous présentons ici deux exemples d'architecture de pilotage mixte (figures 2.15 et 2.16).

- Exemple 1 : architecture à plusieurs superviseurs

Dans ce premier exemple, les échanges d'information sont à peu près les mêmes que dans le cas du pilotage centralisé. Ici toutefois, les centres de décision du niveau 2 (par exemple  $CD^{2,3}$ ) doivent passer des commandes aux groupes de fournisseurs ( $CD^{2,1}$  et  $CD^{2,2}$ ).

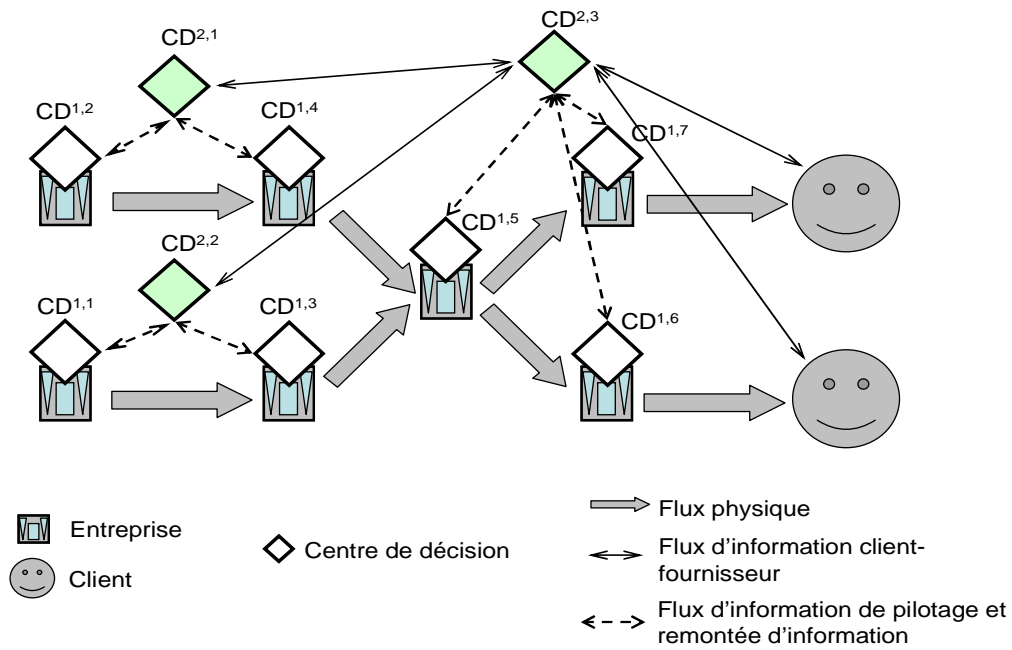


Figure 2.15 : Architecture de pilotage mixte (exemple 1)

Si on ne considère que le niveau 2, on retrouve exactement la configuration du pilotage distribué, si ce n'est que les centres de décision du niveau 2 doivent ici aussi planifier et coordonner les activités de plusieurs entreprises.

• Exemple 2 : architecture de pilotage de deux chaînes avec maillon commun

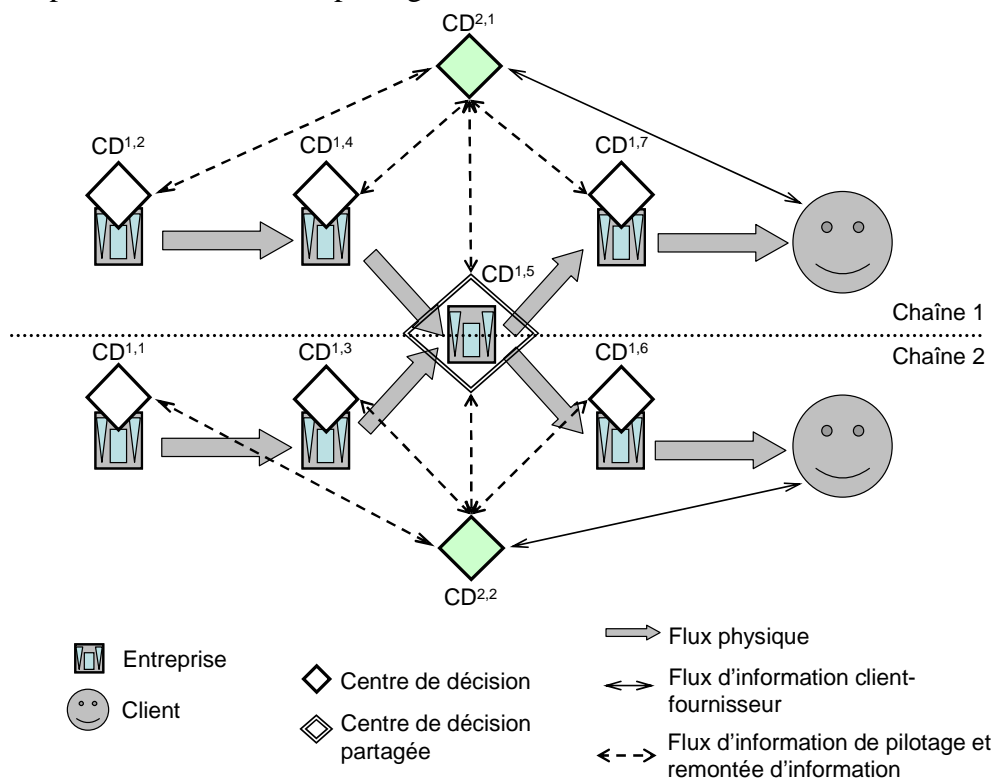


Figure 2.16 : Architecture de pilotage mixte (exemple 2)

Dans ce second exemple, le réseau d'entreprises constitue deux chaînes logistiques (de part et d'autre du pointillé horizontal) et chacune d'elle est pilotée de façon centralisée. Ces deux chaînes sont couplées, car l'une des entreprises (maillon commun) travaille pour ces deux chaînes. Le centre de décision CD<sup>1,5</sup> gérant le maillon commun doit donc partager ses activités entre les deux chaînes. Globalement considérée, l'architecture de pilotage de ce réseau est mixte. Cette architecture particulière de pilotage détermine un **pilotage par chaîne**. Il est important de préciser qu'un centre de décision de niveau supérieur analyse les données disponibles (demande du client, capacité de production, nomenclatures, gammes, niveau de stock, délais...) dans sa propre chaîne et coordonne les entreprises ressources de sa chaîne dans un objectif d'optimisation globale.

Le cas, assez répandu, d'une entreprise en situation de maillon commun pose le problème de la recherche d'un compromis entre les demandes qui proviennent des centres de décision pilotant les chaînes, en fonction des propres objectifs du maillon commun. Cette problématique d'allocation de capacité d'un maillon partagé sera étudiée en détail dans le chapitre 5.

#### 2.4.4 Comparaison rapide des trois types d'architecture de pilotage

En première analyse, les caractéristiques et les propriétés comparées des trois types d'architecture de pilotage (distribuée, centralisée, mixte), sont résumées par le tableau 2.1

|  | Distribué                                    | Mixte                                       | Centralisé                                |
|--|--|---|---|
| Niveaux de décision                    | Mono-niveau                                  | Multi-niveaux                               | Multi-niveaux                             |
| Portée de la décision en planification | Locale<br>(par entreprise)                   | Partielle<br>(sous-ensembles de la chaîne)  | Globale<br>(ensemble de la chaîne)        |
| Source des commandes                   | Les dernières entreprises de la chaîne       | Les centres de décision du niveau supérieur | Le centre de décision du niveau supérieur |
| Diffusion de la demande                | Séquentielle<br>(d'une entreprise à l'autre) | Simultanée                                  | Simultanée                                |

Tableau 2.1 : Comparaison des architectures de pilotage

### 2.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a mis en évidence une diversité limitée des architectures de pilotage des chaînes logistiques, dont une typologie peut être dressée à l'aide du référentiel de modélisation présenté, par l'identification des niveaux décisionnels, des centres de décision et de leurs interrelations structurelles intra- et inter-niveau.

Trois architectures type de pilotage ont été présentées et détaillées : le pilotage distribué et le pilotage centralisé constituent des cas de référence, ainsi que leurs différentes variantes de panachage qui constitue une classe de pilotage mixte.

Chacune de ces architectures de pilotage a son propre fonctionnement. On peut rapprocher les architectures distribuée et centralisée au Kanban et MRP respectivement (§1.2.2). L'architecture distribuée porte en quelque sorte au niveau inter-entreprises les principes de

---

gestion en flux tiré propres au Kanban. A contrario, une architecture centralisée porte au niveau de la planification d'une chaîne logistique les principes de gestion en flux poussé propres au MRP.

La modélisation de l'architecture de décision développée dans le cadre de ce travail a pour but de permettre la simulation du processus de décision de planification afin d'offrir aux exploitants d'une chaîne logistique une estimation de ses performances au regard des décisions qu'ils sont amenés à prendre.

Au terme de cette première analyse typologique des architectures de pilotage des chaînes logistiques, nous présentons dans le chapitre suivant un modèle analytique générique de planification des activités d'une chaîne logistique, instanciable à tout type d'architecture de pilotage, en vue, naturellement d'en étudier la performance. Ce modèle est destiné à être implémenté dans chacun des centres de décision de la chaîne logistique, quel que soit son niveau dans l'architecture.



---

## Chapitre 3

# Modèle générique de planification pour un centre de décision

---

Sommaire :

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.1   | Introduction .....   | 80  |
| 3.2   | Etat de l'art sur la simulation des processus de pilotage de chaînes logistiques.....      | 80  |
| 3.3   | Environnement et paramétrage du problème de planification vu d'un centre de décision.....  | 83  |
| 3.3.1 | Modélisation de l'environnement d'un centre de décision .....                              | 83  |
| 3.3.2 | Les paramètres et variables de décision du modèle de planification .....                   | 86  |
| 3.4   | Le modèle analytique du problème de planification .....                                    | 90  |
| 3.4.1 | Les contraintes du modèle.....   | 90  |
| 3.4.2 | Le critère du modèle.....  | 93  |
| 3.4.3 | Principe de fonctionnement du modèle de planification .....                                | 94  |
| 3.5   | Les relations inter-centres de décision .....  | 95  |
| 3.5.1 | Relations horizontales : échange de type client - fournisseur .....                        | 95  |
| 3.5.2 | Relations verticales : échange entre centres de décision de niveaux successifs ..<br>..... | 98  |
| 3.6   | Conclusion du chapitre.....  | 100 |



## **3 Modèle générique de planification pour un centre de décision**

### **3.1 Introduction**

Le système de pilotage d'une chaîne logistique, quelle qu'en soit l'architecture, est constitué d'un ensemble de centres de décision interreliés, dont les tâches de décision, largement interdépendantes, visent à spécifier et à suivre les activités de production soumises à des objectifs de performance (productivité, réactivité, délais de production...). En planification, chacun des centres de décision reçoit les demandes de ses clients, planifie les activités de ses ressources internes et passe commande à ses fournisseurs. Aussi les tâches de décision menées par les centres de décision, quels qu'en soient le rang et la position hiérarchique dans le système de pilotage, revêtent-elles un caractère générique, du moins pour une large part d'entre elles : ce sont les invariants de la planification. Nous pensons que l'identification et l'explicitation de ces invariants contribuent à l'interopérabilité des entreprises constitutives de la chaîne, grâce à une vision commune de la problématique de planification et à une harmonisation des échanges d'information. Cette vision relève d'une volonté de standardiser et de synchroniser les processus décisionnels mis en œuvre par les différents centres de décision de la chaîne logistique, en vue, naturellement, de faciliter la définition de modes d'exploitation globalement performants.

- *Objectif du chapitre*

Un centre de décision, pour mener à bien une tâche de planification, doit s'appuyer sur un outil d'aide à la décision. C'est l'objet de ce chapitre que de construire un modèle analytique générique pour l'optimisation de la planification des activités de production, instanciable à tout centre de décision au sein des architectures de pilotage décrites dans le chapitre 2. Le modèle se base sur une formalisation unifiée, pour tout centre de décision, des données de planification : plans de production, d'approvisionnement, de livraison, capacités de transformation et de transport, critères d'optimisation.

Ce modèle standard de planification nous permettra, au chapitre 4, d'analyser comparativement les performances de différentes architectures de pilotage (distribuée, mixte et centralisée) appliquées à quelques exemples de référence.

### **3.2 Etat de l'art sur la simulation des processus de pilotage de chaînes logistiques**

Les travaux d'analyse des processus décisionnels par simulation de modèle sont nombreux. Kleijnen (2003) propose de classer les différentes techniques de simulations de chaînes logistiques en quatre grandes parties : i) la simulation par tableur, ii) l'approche par la dynamique des systèmes, iii) l'approche par événements discrets ou simplement iv) les jeux d'entreprises, qui permettent d'éduquer et d'entraîner les utilisateurs à certains aspects de la gestion de la chaîne logistique.

La particularité de l'approche par événements discrets est l'avancement du temps dans la simulation, qui saute d'événement en événement. L'approche par la dynamique des systèmes promeut quant à elle une vision quasi-continue des flux (matières, informations, personnels, argent...).



*Notre approche s'appuyant résolument sur une simulation mathématique par tableur, nous ne détaillerons pas les travaux réalisés dans les autres domaines cités.*

Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons une liste de travaux, non exhaustive, travaillant avec des modèles mathématiques pour la gestion des chaînes logistiques.

- Utilisation des modèles au niveau stratégique

Les modèles mathématiques peuvent être utilisés à tous les niveaux, y compris au niveau stratégique. Par exemple, Jayarama et Pirkul (2001) étudient la configuration (structure, design) d'une chaîne logistique et plus précisément le dimensionnement du nombre d'entrepôts et de sites de production. Leur modèle mathématique est un programme linéaire (toutes les relations, critère compris, s'écrivent sous forme d'une somme algébrique de variables, pondérée par des paramètres) et mixte (certaines variables sont réelles et d'autres entières), le but étant de définir une topologie optimale de la chaîne logistique.

Toujours au niveau stratégique, Bouchriha et Ladet (2002) analysent le problème du 'make or buy' : faire appel à des sous-traitants ou non. Leur modélisation cherche à minimiser les coûts de production en interne, les coûts d'achat, de transport et de stockage. Elle prend en compte les capacités minimales et maximales de production et de transport. Des variables binaires permettent de savoir si les ressources internes sont utilisées ou non pour la production.

- Utilisation des modèles au niveau tactique et opérationnel

Les modèles présentés ici s'appliquent au niveau tactique et/ou opérationnel, qui est également le cadre dans lequel se situe notre étude.

Ozdamar et Tülin (1999) s'intéressent à la distribution des produits vers les clients en passant par des entrepôts avec un pilotage hiérarchisé sur deux niveaux. L'objectif des modèles mathématiques linéaires mixtes (i.e. agrégés et détaillés) est de répartir les produits en sortie d'usine sur les entrepôts afin de minimiser les coûts de transport, de stockage et de rupture. L'intérêt du niveau agrégé est de travailler sur un horizon plus long (agrégation du temps) et sur des familles de produits (agrégation des produits). Les auteurs remarquent que plusieurs itérations de négociation peuvent être nécessaires entre les deux niveaux, afin de trouver une solution.

Dudek et Stadtler (2005) étudient la négociation entre un client et son fournisseur sur cinq structures physiques différentes. La négociation est nécessaire lorsque la demande d'un client ne peut pas être satisfaite. Ils proposent des modèles de planification dont une partie est générique, le reste étant une extension suivant le rôle du décideur (fournisseur ou client). Un modèle fournisseur est donc centré sur les processus production et distribution, alors que le modèle du client est centré sur les processus approvisionnement et production. Mais, il n'y a

pas d'intégration totale de ces processus. Ces modèles prennent en compte la capacité de production des ressources, avec éventuellement une augmentation de celle-ci (par des heures supplémentaires ou le recours à un sous-traitant). Comme c'est souvent le cas au niveau tactique, les temps de réglage des machines (setup times) sont négligés.

Haehling Von Lanzener et Pilz-Glombik (2002) développent un modèle pour l'optimisation des décisions dans un environnement collaboratif. Le modèle cherche à maximiser le profit défini comme la différence entre la somme des ventes et la somme des coûts (achat, stockage, transport et rupture). Le modèle, qui prend en compte un délai de propagation de l'information, est ensuite appliqué sur la structure série du jeu de la bière (usine, distributeur, grossiste, détaillant et client). Ici, seul le processus de distribution est pris en compte.

Kirche et al. (2005) utilisent un modèle analytique de planification avec des contraintes et comparent les résultats avec deux critères différents. Un critère consiste à maximiser le profit « direct » c'est-à-dire la différence entre les ventes et les achats en matières premières (approche par la théorie des contraintes), et l'autre fonction reprend la première en incluant d'autres coûts tels que les coûts de production, de préparation, de stockage et de gestion des commandes (approche par la méthode ABC – Activity-Based Costing). Dans ce modèle, aucun délai de transport n'est pris en compte. Il n'y a pas de coût de rupture, mais une variable binaire permet d'accepter ou de refuser une commande. Avec cette technique, seules les demandes réalisables sont acceptées. Il ne peut donc pas y avoir de retard !



*Dans notre approche, nous considérerons que toutes les demandes doivent être réalisées, si nécessaire avec retard.*

Lakhal et al. (1999 et 2001) développent une formalisation générale des systèmes de production intra ou inter-entreprises, autorisant l'agrégation de l'information. Sans détailler l'ensemble des contraintes, un cadre est posé pour chacune d'elles (par exemple, une relation entre les quantités de production d'une activité, les quantités entrantes et sortantes ou encore une relation qui explicite le mécanisme de partage des coûts). Toutes les variables sont des réelles, e.g. les capacités des ressources et les coûts d'utilisation des ressources.

- *Positionnement de la thèse dans l'état de l'art*

Notre approche propose un outil d'aide à la décision pour la planification tactique et utilise une simulation par tableur qui calcule les quantités à produire par période avec une avance du temps par incrément sur un horizon glissant. Le tableur est couplé à un solveur (Xpress-MP) du modèle mathématique linéaire en nombre réel que nous avons élaboré, ce qui permet de trouver la solution optimale du problème de planification vu par un centre de décision. Le programme linéaire traduit la fonction objectif que l'on cherche à optimiser, et une liste de contraintes sous forme d'équations et/ou d'inéquations reliant les divers paramètres et variables propres au problème de planification.

### 3.3 Environnement et paramétrage du problème de planification vu d'un centre de décision

#### 3.3.1 Modélisation de l'environnement d'un centre de décision

Nous listons certaines hypothèses décrites dans les chapitres précédents et qui sont reprises dans notre modélisation du processus de planification. Ces hypothèses délimitent le domaine de validité du modèle. Voici les principales :

- Les entreprises de la chaîne travaillent toutes « à la commande ».
- Les produits sont référencés sur l'ensemble de la chaîne logistique.
- La nomenclature est convergente.
- La planification se fait à horizon glissant.
- Les centres de décision d'un même niveau planifient avec le même couple horizon / période. Et le découpage temporel en périodes élémentaires est le même pour tous les centres de décision.
- Les coûts de transport ne sont pas pris en compte dans le modèle de planification.
- Les délais de transport et de production ne dépendent pas du temps. De même pour le coût d'achat des composants et le prix de vente des produits.
- Le coût de rupture est indépendant du client.

A partir de ces hypothèses, nous avons modélisé l'environnement d'un centre de décision comme l'explique la figure 3.1.

Un centre de décision est en relation avec ses clients, ses fournisseurs, les centres de décision de niveau supérieur et les ressources internes avec lesquelles il échange des informations. De plus, au plus bas niveau, les ressources ne sont perçues que par leurs stocks entrants et sortants et leur en-cours de production. Ces ressources sont des « boîtes noires » vues du centre de décision.

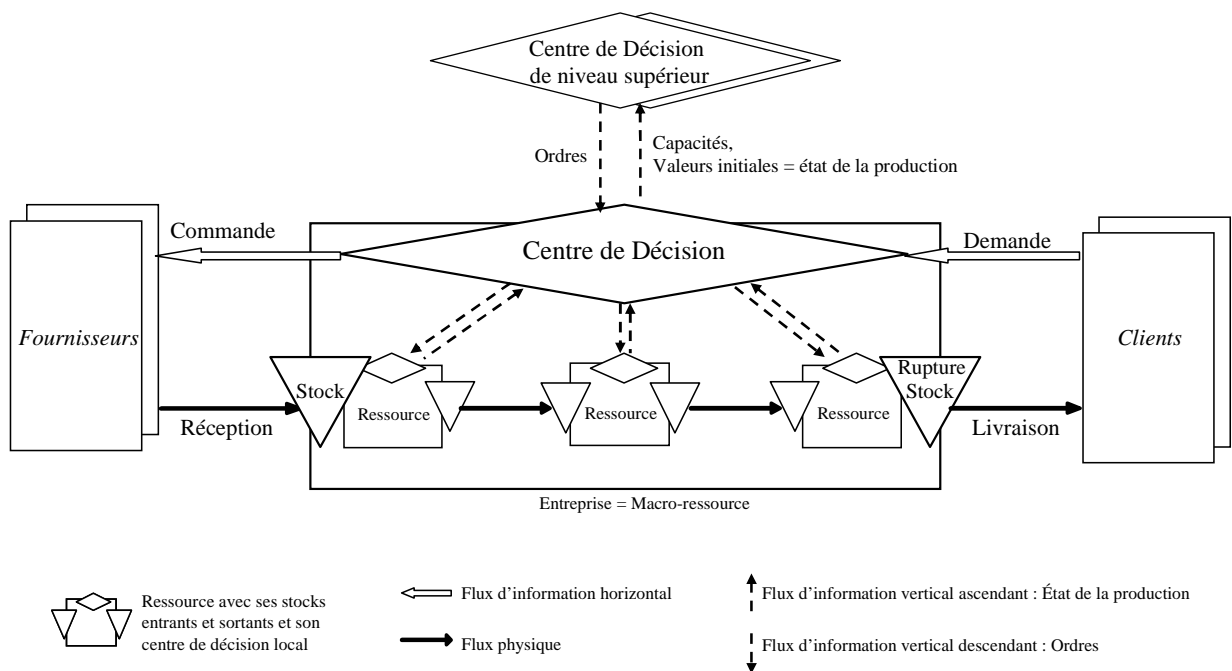


Figure 3.1 : Environnement d'un centre de décision

Notons que cette modélisation de l'environnement d'un centre de décision permet d'agréger les ressources et les produits dans une vue multi-niveaux. En effet, sur la figure 3.1, le centre de décision de niveau supérieur peut se satisfaire d'une vision externe de l'entreprise et la percevoir comme une macro-ressource en ne considérant que les stocks de composants et de produits finis et les en-cours de production. Néanmoins, les relations d'agrégation/désagrégation des informations d'un niveau à un autre (Lecompte-Alix, 2001) et les approches de planification hiérarchisées (Hétreux, 1996) n'ont pas été développées dans le cadre de ce travail et constituent des perspectives de généralisation de nos résultats.

Une notation ensembliste est utilisée pour définir les indices, variables et paramètres d'un centre de décision. Nous listons ici les ensembles nécessaires pour saisir l'environnement d'un centre de décision donné  $CD^{n,s}$  où  $n$  représente le niveau et  $s$  l'identifiant du centre de décision à ce niveau.

### 3.3.1.1 Les ensembles pour définir l'environnement d'un centre de décision

- **Définition de la structure du système physique**

On définit les ensembles permettant de caractériser la topologie de la chaîne, en repérant les entités du système physique et les relations client-fournisseur entre celles-ci, ainsi que les produits manipulés. **Tous ces ensembles portent implicitement les exposants  $n$  et  $s$ , mais dans un souci de clarté, ceux-ci ont été omis pour le moment.**

- $\bar{E}_r$  Ensemble des entités en amont (ou fournisseurs) de la ressource  $r$
- $\underline{E}_r$  Ensemble des entités en aval (ou clients) de la ressource  $r$
- $\bar{P}_r$  Ensemble des produits entrants (ou composants) de la ressource  $r$
- $\underline{P}_r$  Ensemble des produits sortants (ou « produits finis ») de la ressource  $r$
- $P_r$  Ensemble des produits manipulés par la ressource  $r$  ( $P_r = (\bar{P}_r \cup \underline{P}_r)$ )

- **Définition de l'architecture de pilotage**

On détermine le réseau de centres de décision environnant le centre de décision considéré, en repérant les entités avec lesquelles le centre de décision échange des informations.

- $\bar{E}$  Ensemble des clients en relation avec le centre de décision
- $\underline{E}$  Ensemble des fournisseurs en relation avec le centre de décision
- $\check{E}$  Ensemble des ressources internes gérées par le centre de décision
- $\hat{E}$  Ensemble des centres de décision de niveau supérieur au centre de décision considéré

Ces ensembles permettent de définir la structure et le flux physique du réseau limité aux ressources internes  $r$  gérées par le centre de décision. Avec cette approche ensembliste, il n'y a aucune difficulté à modéliser une chaîne logistique de structure convergente, divergente, série ou même un réseau de topologie quelconque.

- Conditions pour une chaîne série (enchaînement de ressources en série) :

$$\text{Card}(\bar{E}_r) = 1 \text{ et } \text{Card}(\underline{E}_r) = 1 \quad \forall r \in \check{E}$$

- Conditions pour une structure convergente :

$$\text{Card}(\bar{E}_r) > 1 \text{ et } \text{Card}(\underline{E}_r) = 1 \quad \forall r \in \check{E}$$

- Conditions pour une structure divergente :

$$\text{Card}(\bar{E}_r) = 1 \text{ et } \text{Card}(\underline{E}_r) > 1 \quad \forall r \in \check{E}$$

### 3.3.1.2 Les indices utilisés dans le modèle

Voici la liste et la définition des indices utilisés dans le modèle de planification pour désigner la variété des entités structurelles de la chaîne logistique, des produits et la représentation du temps :

- **Indice des entités structurelles de la chaîne**

$r \quad r \in \vec{E} \cup \check{E} \cup \vec{\check{E}} \quad \text{Indice des entités (ressources internes, fournisseurs et clients) en relation avec un centre de décision}$

- **Indice des produits**

$p \quad p \in \bigcup_{r \in \vec{E}} P_r \quad \text{Indice des produits}$

Les produits transportés entre deux entités successives (fournisseur – client) ne sont pas transformés pendant le transport et donc le produit  $p$  sortant du fournisseur est identifié de la même façon que le produit  $p$  entrant chez le client. Cela sous-entend que **les produits sont référencés à l'échelle de la chaîne logistique** et non à l'échelle de l'entreprise. Par exemple, dans le cas d'une structure série stricte où chaque entité possède au plus un fournisseur et au plus un client, les ensembles des produits sont identiques pour toute entité :

$$\vec{P}_{\text{Fournisseur}} = \vec{P}_{\text{Client}}$$

Mais cela ne veut pas dire que nous ne faisons pas la distinction du stock de produit  $p$  chez le fournisseur et du stock du même produit  $p$  chez le client. Cette différenciation se fera grâce à la localisation du produit.

- **Indice temporel**

Conformément à l'hypothèse faite plus haut, le couple horizon/période est identique pour tout centre de décision du même niveau.

Nous définissons l'horizon  $H$  de planification comme un ensemble de périodes élémentaires :

$t \quad \text{Indice de périodes élémentaires de planification ( } t \in H \text{ )}$

Par rapport à l'instant présent, la dernière période passée est notée  $t = 0$  et la première période future est notée  $t = 1$ . L'indice  $t$  pourra aussi être négatif pour prendre en compte le temps passé.

### 3.3.1.3 Exemple de notation

Nous résumons la notation ensembliste en prenant comme exemple l'architecture de pilotage centralisée, présentée au chapitre 2 (figure 2.13). Nous considérons le centre de décision  $CD^{2,1}$ , qui voit l'ensemble de la chaîne, et décrivons son environnement :

- $H = \{1, \dots, 12\}$  : L'horizon vaut un an et est divisé en douze périodes d'un mois.
- $\check{E} = \{CD^{1,1}, CD^{1,2}, CD^{1,3}, CD^{1,4}, CD^{1,5}, CD^{1,6}, CD^{1,7}\}$  : le centre de décision  $CD^{2,1}$  pilote l'ensemble des centres décisionnels qu'il considère comme ses ressources.
- $\vec{E} = \{\text{Client 1 et 2}\}$  : le centre de décision voit les deux clients du réseau.
- $\vec{E} = \emptyset$  : le centre de décision  $CD^{2,1}$  n'a pas de fournisseurs.

- $\vec{E}_{CD^{1,5}} = \{CD^{1,6}, CD^{1,7}\}$  : le centre de décision local  $CD^{1,5}$  a pour client les centres de décision 6 et 7 du niveau 1.
- $\overleftarrow{E}_{CD^{1,5}} = \{CD^{1,3}, CD^{1,4}\}$  : le centre de décision local  $CD^{1,5}$  a pour fournisseur  $CD^{1,3}$  et  $CD^{1,4}$ .

Nous rappelons que l'indice des ressources  $r$  ne correspond pas uniquement aux ressources internes, mais s'étend aussi aux fournisseurs et clients. Ainsi, dans le cas du centre de décision  $CD^{2,1}$  de la figure 2.13, nous avons  $r \in \{CD^{1,1}, CD^{1,2}, CD^{1,3}, CD^{1,4}, CD^{1,5}, CD^{1,6}, CD^{1,7}, Client1, Client2\}$ .

### 3.3.2 Les paramètres et variables de décision du modèle de planification

Quelles sont les informations qui définissent le problème de planification d'un système de production, et d'où viennent-elles ? Varient-elles à chaque pas de calcul ? Nous nous attachons à répondre à ces questions avant de proposer un modèle de planification.

#### 3.3.2.1 Notations utilisées

La complexité du problème de planification amène à définir un système de notation facilitant la modélisation. Nous introduisons un système de notation (figure 3.2) explicitant, pour une information  $X$ , un ensemble d'attributs.

Les exposants  $n$  et  $s$  identifient le centre de décision  $CD^{n,s}$  auquel se rapporte l'information. Ces exposants seront omis si le centre de décision est implicite.

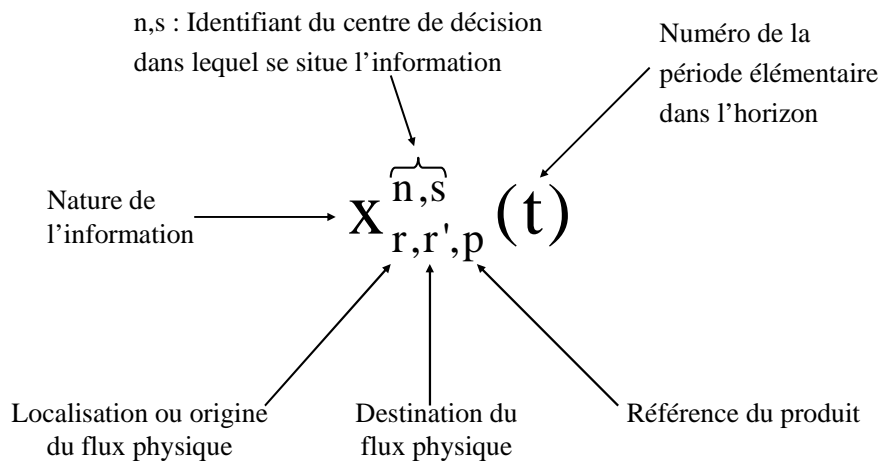


Figure 3.2 : Notations utilisées pour les variables et paramètres du modèle

Le nombre d'indices dépend de la nature de l'information. Les indices  $r$  et  $r'$  représentent des **ressources** et sont requis pour référencer un flux physique entre ces ressources (transport d'un site à un autre). Dans ce cas, le premier correspond à l'origine du flux, et le second à la destination du flux. Lorsqu'il n'y a qu'une seule ressource spécifiée, celle-ci représente la localisation de l'information désignée (e.g. stock dans un site).

L'indice  $p$  précise la **référence** du produit manipulé. Parfois, deux références de produit sont nécessaires (le composant et le produit), s'agissant de décrire une nomenclature.

Enfin, l'indice  $t$  identifie la **période élémentaire** sur laquelle porte l'information.

### 3.3.2.2 Les paramètres du modèle

Voici la liste des paramètres utilisés dans le modèle :

- Les paramètres décrivant le système de production :

$K_{r,p,p'}$  Coefficients de nomenclature (quantité de composants  $p$  nécessaire pour produire une unité de produit  $p'$  dans la ressource  $r$ )

$DP_{r,p}$  Délai de production du produit  $p$  sur la ressource  $r$

$DL_{r,r'}$  Délai de livraison de la ressource  $r$  à la ressource  $r'$

Nous faisons l'hypothèse que ces délais sont invariables dans le temps.

- Les paramètres relatifs aux capacités :

$\alpha_p$  Quantité de ressource nécessaire pour la production d'un produit  $p$

$\beta_p$  Poids ou volume unitaire d'un produit  $p$

$\delta_p$  Espace nécessaire pour stocker une unité de produit  $p$

$CapR_r(t)$  Capacité de production de la ressource  $r$  pendant la période  $t$

$CapS_r(t)$  Capacité de stockage de la ressource  $r$  pendant la période  $t$

$CapT_{r,r'}(t)$  Capacité de transport de la ressource  $r$  à la ressource  $r'$  pendant la période  $t$

- Les paramètres économiques :

$PV_{r,p}$  Prix de vente unitaire du produit  $p$  pour le client  $r$

$CA_{r,p}$  Coût moyen d'achat unitaire du composant  $p$  chez le fournisseur  $r$

$CS_{r,p}$  Coût moyen de stockage unitaire du produit  $p$  auprès de la ressource  $r$

$CP_{r,p}$  Coût moyen de production unitaire du produit  $p$  par la ressource  $r$

$CR_{r,p}$  Coût moyen de rupture unitaire du produit  $p$  dans la ressource  $r$

Nous faisons l'hypothèse que le coût de rupture ne dépend pas du client. C'est une simplification. Dans la réalité, ce manque à gagner peut dépendre du contrat passé avec le client.

- Les conditions initiales :

$IO_{r,p}$  Quantité initiale de stock du produit  $p$  associé à la ressource  $r$  à la fin de la période 0

$BO_{r,r',p}$  Quantité de produit  $p$  en rupture de stock initialement associé à la ressource  $r$  pour son client  $r'$  à la fin de la période 0

$FO_{r,p}(t)$  Quantité de produit  $p$  en cours de production dans la ressource  $r$  pendant la période  $t$   
( $1 - DP_{r,p} \leq t \leq 0$ )

$QO_{r,r',p}(t)$  Quantité de composant  $p$  en cours de transport d'une entité  $r$  vers une entité  $r'$  pendant la période  $t$  ( $1 \leq t \leq DL_{r,r'}$ )

- Les paramètres relatifs au carnet de demandes :

$d_{r',r,p}(t)$  Demande de produit  $p$  pour la période  $t$  du client  $r'$  à la ressource  $r$



- Les paramètres relatifs aux ordres de niveau supérieur :
  - $O_{r,p}(t)$  Ordre de production des centres de décision de niveau supérieur en produit  $p$  pour la période  $t$  destiné à la ressource interne  $r$
  - $C_{r,r',p}(t)$  Ordre de livraison des centres de décision de niveau supérieur pour la période  $t$  pour le fournisseur  $r$  livrant la ressource interne  $r'$  en composant  $p$
  - $\phi_p, \lambda_p$  Poids dans le critère donnant plus ou moins d'influence aux ordres de production et de livraison des centres de décision de niveau supérieur.

La valuation des paramètres techniques et financiers est supposée faite par les experts utilisateurs du modèle.

### 3.3.2.3 Les variables du modèle

Voici la liste des variables de décision du problème de planification :

- $i_{r,p}(t)$  Niveau de stock en produit  $p$  associé à la ressource  $r$  à la fin de la période  $t$
- $f_{r,p}(t)$  Quantité de produit  $p$  à lancer en production dans la ressource  $r$  en période  $t$
- $l_{r,r',p}(t)$  Quantité de produit  $p$  à livrer pendant la période  $t$  de l'entité  $r$  vers l'entité  $r'$
- $q_{r,r',p}(t)$  Quantité de composant  $p$  reçu pendant la période  $t$  par l'entité  $r'$  depuis l'entité  $r$
- $b_{r,r',p}(t)$  Quantité de produit  $p$  en rupture de stock associé à la ressource  $r$  pour son client  $r'$  à la fin de la période  $t$

Toutes ces variables sont indicées par la période de planification. Elles sont donc toutes fonction du temps. Elles constituent les plans : plan de production, plan de demande, plan de livraison, ...

Pour définir les niveaux de stock et les quantités à produire, il suffit de trois indices : la ressource, le type de produit, et la période de planification. Par contre, toutes les autres variables sont relatives à un flux (ou à une absence de flux dans le cas de ruptures) de produits ou d'informations entre des entités de la chaîne logistique. Pour ces variables, en plus du type de produit et de la période de planification, il faut expliciter l'origine et la destination du flux. Les indices associés (en général  $r$  et  $r'$ ) sont toujours placés dans cet ordre : origine puis destination.

### 3.3.2.4 Flux d'information envers les autres entités du réseau logistique

Les entités d'une chaîne logistique échangent entre elles diverses informations. Nous allons ici détailler les échanges sur les seules informations liées à notre problème de planification, c'est-à-dire les paramètres et variables du modèle de planification, présentés ci-dessus.

Le tableau 3.1 résume, dans le cas d'une entreprise liée avec ses fournisseurs, ses clients et les centres de décision de niveau supérieur, l'ensemble des informations qu'un centre de décision manipule pour réaliser une planification, listées en fonction de leur provenance et de leur destination (cf. figure 3.1). Ce tableau reprend la classification des informations vue au chapitre 2 (cf. §2.2.2) :

- Les informations endogènes sont dans les cases blanches, et les informations exogènes sont dans les cases grisées.
- Les informations mises à jour à chaque nouveau calcul de la planification en horizon glissant sont mentionnées en gras, les autres sont considérées comme invariables, car on suppose que la structure de la chaîne logistique est stable (pas de nouveau produit, pas de nouveau fournisseur...).

| Interlocuteurs du centre de décision<br>CD <sup>n,s</sup> | Paramètres<br>(informations reçues par le CD <sup>n,s</sup> de ses interlocuteurs)   | Variables<br>(informations élaborées dans le CD <sup>n,s</sup> et transmises à ses interlocuteurs) |
|---|--|--|
| Ressources pilotées<br>$r \in \bar{E}$                    | Nomenclatures, $K_{r,p,p'}$<br>Capacités et coefficients de production, stockage et transport,<br>$CapR_r(t)$ $\alpha_p$ $CapS_r(t)$ $\beta_p$ $CapT_{r,r'}(t)$ $\delta_p$<br>Délais de production, de livraison, $DP_{r,p}$ $DL_{r,r'}$<br>Coûts unitaires de production, stockage et rupture, $CP_{r,p}$ $CS_{r,p}$ $CR_{r,p}$<br><b>Suivi de production détaillé : niveau de stock, de rupture, en-cours de production</b> $IO_{r,p}$ $BO_{r,r',p}$ $FO_{r,p}(t)$ | <b>Plan de production</b><br>$f_{r,p}(t)$  |
| Fournisseurs<br>$r \in \bar{E}$                           | Coût unitaire d'achat $CA_{r,p}$<br><b>Approvisionnement</b> (en-cours de transport) $QO_{r,r',p}(t)$  | <b>Plan de commande</b><br>$q_{r,r',p}(t + DL_{r,r'})$   |
| Clients<br>$r' \in \bar{E}$                               | Prix unitaire de vente $PV_{r',p}$<br><b>Plan de demande</b> $d_{r',r,p}(t)$   | <b>Plan de livraison</b><br>$l_{r,r',p}(t)$  |
| CD de niveau supérieur<br>$a \in \bar{E}$                 | <b>Plan d'ordre de production</b> $O_{r,p}(t)$<br><b>Plan d'ordre de commande</b> $C_{r,r',p}(t)$  | <b>Plan de capacité</b><br>$CapR_{a,r}(t)$   |
| Informations non communiquées                             | Politique de gestion (critère à optimiser) $\phi_p, \lambda_p$   | <b>Plan de rupture,</b><br>$b_{r,r',p}(t)$<br><b>Plan de stock</b><br>$i_{r,p}(t)$                 |

Tableau 3.1 : Les informations d'un centre de décision en planification

Les informations reçues par le centre de décision de la part de ses interlocuteurs sont placées dans la colonne « paramètres ». Le centre de décision peut regrouper certaines informations, comme les demandes des clients, pour en faire un plan (plan de demande par exemple). Concernant les coûts d'achat de composants et les prix de vente des produits, ils peuvent être négociés respectivement avec les fournisseurs et les clients et à ce titre apparaissent ainsi dans le tableau. Dans notre étude, ces prix sont considérés constants sur l'horizon de planification.

Les valeurs que véhiculent les variables sont des informations résultant de la prise de décision et transmises à différents interlocuteurs. Généralement ce sont des « plans » (de production, de commande, de livraison...) définis par des quantités sur l'horizon de planification. Concernant le plan de commande, celui-ci est défini par rapport au plan de besoin ( $q_{r',r,p,t}$ ), aux délais de livraison près.

Cependant, certaines variables ne sont pas échangées avec d'autres entités (dernière ligne du tableau) : il s'agit des plans de rupture et de stock, ainsi que certains paramètres déterminant la propre politique ou stratégie de gestion du centre de décision, comme la valeur des coefficients qui pondèrent certains éléments du critère d'optimisation.

### 3.4 Le modèle analytique du problème de planification

#### 3.4.1 Les contraintes du modèle

Un système de production est soumis à des contraintes, comme les extrema des stocks ou encore les capacités des ressources. Ces contraintes se traduisent dans le modèle sous forme d'équations ou d'inéquations. Voici la liste des contraintes d'un système de production vu d'un centre de décision donné.

- *Conservation de la matière dans les stocks*

$$i_{r,p}(t) = i_{r,p}(t-1) + f_{r,p}(t - DP_{r,p}) - \sum_{r' \in \vec{E}_r} l_{r,r',p}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (1)$$

$$i_{r,p}(t) = i_{r,p}(t-1) + \sum_{r' \in \vec{E}_r} q_{r',r,p}(t) - \sum_{p' \in \vec{P}_r} (K_{r,p,p'} * f_{r,p'}(t)) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (2)$$

Les contraintes (1) et (2) représentent la conservation de la matière dans les stocks et leur évolution, pour les produits respectivement sortants et entrants d'une ressource. Elles décrivent pour chaque période de temps les mouvements d'entrée et de sortie des matières.

La première contrainte calcule les niveaux de stock de chaque produit sortant dans toutes les ressources internes en fonction des produits issus de la production et de tous les produits livrés vers leurs clients. La quantité de produit issue de la production à la période  $t$  correspond à la quantité lancée en production au délai de production près. Dans ces calculs, on suppose donc qu'il n'y a aucune perte lors de la production.

La seconde contrainte évalue les niveaux de stock de chaque composant (ou produit entrant) associés à chaque ressource interne en fonction des quantités reçues par leurs fournisseurs et des quantités nécessaires pour la production, faisant apparaître les coefficients de nomenclature, puisque la quantité lancée en production correspond au nombre de produits sortants désirés. Cette contrainte permet de travailler avec des nomenclatures convergentes ( $n$  composants pour un produit) et aussi pour les opérations de « découpage » (1 composant pour  $n$  produits de même référence). Les autres cas n'ont pas été traités.

- *Expression des ruptures*

$$b_{r,r',p}(t) = b_{r,r',p}(t-1) + d_{r',r,p}(t) - l_{r,r',p}(t) \quad \forall r' \in \vec{E}, \forall r \in \vec{E}_{r'}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (3)$$

La contrainte (3) permet d'exprimer les ruptures, i.e. la différence entre la demande des clients et la livraison des produits vers ces clients. La définition des variables  $b_{r,r',p}(t)$  permet de garantir l'existence d'une solution au problème de planification considéré, tout en permettant si nécessaire la pénalisation de la solution par un coût lié à la non satisfaction du client (cas où  $d_{r',r,p}(t) > l_{r,r',p}(t)$ ). Les ruptures ne sont alors décelables qu'en mettant les quantités livrées au regard des quantités commandées par le client. Notons que les ruptures ne sont définies que pour les produits « finis » destinés aux clients du centre de décision considéré ( $\forall r' \in \vec{E}$ ). En effet, comme le centre de décision a pour objectif de coordonner ses ressources internes, il ne peut pas se permettre des ruptures de stock pour ses produits intermédiaires.

- *Respect des capacités de ressources de production*

$$\sum_{p \in P_r} \left( \alpha_p \cdot \sum_{\tau=1}^{DP_{r,p}} f_{r,p}(t-\tau+1) \right) \leq \text{Cap}R_r(t) \quad \forall r \in \tilde{E}, \forall t \in H \quad (4)$$

La contrainte (4) traduit le respect des capacités de ressources de production dont on rappelle que les variables  $f_{r,p}(t)$  expriment le lancement en fabrication de quantités d'articles. Lorsque la fabrication s'étale sur plusieurs périodes, le calcul de la charge pour chaque période doit tenir compte du travail induit par les lancements en fabrication antérieurs à la période considérée. D'où la somme sur  $\tau$  qui balaye les périodes antérieures jusqu'au délai de production de la ressource ( $1 \leq \tau \leq DP_{r,p}$ ).

- *Respect des capacités de stockage*

$$\sum_{p \in P_r} \delta_p \cdot i_{r,p}(t) \leq \text{Cap}S_r(t) \quad \forall r \in \tilde{E}, \forall t \in H \quad (5)$$

La contrainte (5) concerne le respect des capacités de stockage ; celles-ci traduisent les limites d'utilisation de l'espace alloué aux stocks. Pour chaque ressource, et pour chaque période de l'horizon de planification, on s'assure que l'espace occupé par tous les produits stockés est inférieur à l'espace disponible pour le stockage. Ici, la contrainte s'applique à tous les produits (entrants et sortants) d'une ressource. Il est aussi possible d'appliquer et/ou de dupliquer cette contrainte pour un (ou des) sous-ensemble(s) de ces produits. Par exemple, on peut limiter les stocks de produits entrants d'une part, et les stocks de produits sortants d'autre part. Ou encore limiter le stock d'un seul produit (par exemple un liquide contenu dans une citerne). En fait, la somme sur les produits dans la contrainte (5) suppose que ces produits puissent se mélanger dans un espace donné.

- *Caractérisation des activités de transport*

$$\sum_{p \in P_r} \beta_p \cdot j_{r,r',p}(t) \leq \text{Cap}T_{r,r'}(t) \quad \forall r \in \tilde{E}, \forall r' \in \tilde{E}_r, \forall t \in H \quad (6)$$

La contrainte (6) caractérise les activités de transport : les moyens de transport sont pris en compte dans le modèle à travers leur capacité (interprétable comme une limitation du débit de produits en sortie de chaque unité de production). Cela revient à supposer qu'un certain nombre de moyens de transport, de capacité totale  $\text{Cap}T_{r,r'}(t)$ , est disponible à chaque période pour livrer les produits vers les clients. Cette contrainte peut s'appliquer pour limiter le poids ou le volume des produits à transporter (Rappel :  $\beta_p$  correspond au poids ou volume unitaire d'un produit  $p$ ). Il est aussi possible d'affiner cette contrainte (en la dupliquant) pour limiter à la fois le volume et le poids des produits à livrer, ou encore pour l'appliquer à un ensemble restreint de produits sortants.

Les contraintes de transport et de stockage ne sont pas fréquemment prises en compte dans les modèles de la littérature, qui se focalisent sur les contraintes de capacité de production. Sauf s'il s'agit de réseaux de distribution, mais dans ce cas, la contrainte sur les capacités de production disparaît...

L'originalité est ici de rassembler toutes les contraintes de capacité (production, stockage et transport), modélisées sous une forme identique, de façon à obtenir un modèle générique et à pouvoir l'appliquer à n'importe quelle entité de la chaîne logistique (site de production, entrepôt, détaillant, ...).

$$I_{r,r',p}(t - DL_{r,r'}) = q_{r,r',p}(t) \quad \forall r \in \check{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r \cap \vec{P}_{r'}, \forall t \in H \quad (7)$$

La contrainte (7) simule la consommation en temps pour ces activités de transport. Elle tient compte de l'hypothèse de non déperdition de matières : la quantité reçue d'un composant à la période  $t$  dans une ressource interne est égale à la quantité sortie de son fournisseur au délai de livraison près.

- *Contraintes de non-négativité des variables*

$$q_{r,r',p}(t), i_{r,p}(t), f_{r,p}(t), b_{r,r',p}(t), l_{r,r',p}(t) \geq 0 \quad \forall r \in \check{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (8)$$

Enfin la contrainte (8) assure que toutes les variables du modèle sont positives ou nulles. Ces contraintes évitent d'obtenir des solutions sans signification physique (stocks négatifs, ...).

- *Contraintes d'initialisation*

Les contraintes suivantes (9 à 12) initialisent les variables (termes de gauche) par des valeurs paramétriques (termes de droite), et permettent de saisir les conditions initiales du problème sur :

- les stocks initiaux

$$i_{r,p,0} = IO_{r,p} \quad \forall r \in \check{E}, \forall p \in \vec{P}_r \quad (9)$$

- les ruptures initiales

$$b_{r,r',p,0} = BO_{r,r',p} \quad \forall r \in \check{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r \quad (10)$$

- les en-cours de production

$$f_{r,p}(t) = FO_{r,p}(t) \quad \forall r \in \check{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in \{1 - DP_{r,p}, \dots, 0\} \quad (11)$$

- les en-cours de transport

$$q_{r,r',p}(t) = QO_{r,r',p}(t) \quad \forall r \in \check{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in \{1, \dots, DL_{r,r'}\} \quad (12)$$

Les contraintes (9 à 12) ne sont pas définies sur tout l'horizon, mais uniquement sur certaines périodes. Il s'agit :

- des états juste passés ( $t = 0$  pour les stocks et les ruptures),
- des actions qui ont débuté avant l'instant de décision ( $t < 0$ ) mais qui ont encore un impact sur l'avenir, comme les produits lancés en production mais qui ne sont pas encore sortis de la ressource,
- des actions extérieures débutées avant l'instant de décision mais qui impactent une partie de l'avenir ( $t > 0$ ), comme les composants en cours de transport mais qui vont arriver prochainement à destination.

Le modèle ainsi défini travaille sur des données réelles : c'est un modèle analytique en nombre réel. Un passage à un modèle en nombre entier ne pose pas de problème technique majeur, mais tend à contraindre encore plus la résolution du problème. Il en résulte des temps de calcul nettement plus conséquents que pour un modèle en nombre réel. Notre objectif n'étant pas en soit la recherche d'optimalité, mais plus spécifiquement la comparaison des performances des différentes architectures de pilotage, la nature non entière des variables n'enlève rien à la pertinence des résultats qui seront discutés ultérieurement.

### 3.4.2 Le critère du modèle

En complément du cadre décisionnel ainsi défini, la stratégie de résolution du problème de planification peut être modélisée par un ou plusieurs critères à optimiser, que nous combinerons dans une unique fonction scalaire ‘de coût’ ou fonction ‘objectif’ (au sens de l’optimisation). Le critère choisi est de nature économique, ce qui, d’une part, répond naturellement aux préoccupations des acteurs de la chaîne logistique, et, d’autre part, procure une agrégation homogène des composantes de la fonction objectif. La fonction objectif de notre modèle de planification s’exprime ainsi :

$$\text{Max } C = \text{Max } (C_{\text{gain}} - C_{\text{pénalités}}), \text{ où} \quad (13)$$

$$C_{\text{gain}} = \sum_{t \in H} \left[ \sum_{r' \in \vec{E}} \sum_{r \in \vec{E}_r} \sum_{p \in \vec{P}_r} l_{r,r',p}(t) \cdot \text{PV}_{r,p} - \sum_{r \in \vec{E}} \sum_{r' \in \vec{E}_r} \sum_{p \in \vec{P}_r} q_{r,r',p}(t) \cdot \text{CA}_{r,p} - \sum_{r \in \vec{E}} \left( \sum_{p \in \vec{P}_r} i_{r,p}(t) \cdot \text{CS}_{r,p} + \sum_{p \in \vec{P}_r} f_{r,p}(t) \cdot \text{CP}_{r,p} \right) - \sum_{r' \in \vec{E}} \sum_{r \in \vec{E}_r} \sum_{p \in \vec{P}_r} b_{r,r',p}(t) \cdot \text{CR}_{r,p} \right] \quad (14)$$

et

$$C_{\text{pénalités}} = \sum_{t \in H} \left( \sum_{r' \in \vec{E}_r / r \in \vec{E}} \sum_{p \in \vec{P}_r} \phi_p |f_{r',p}(t) - O_{r',p}(t)| + \sum_{r' \in \vec{E}} \sum_{r \in \vec{E}_r} \sum_{p \in \vec{P}_r} \lambda_p |q_{r',r,p}(t) - C_{r',r,p}(t)| \right) \quad (15)$$

La maximisation de la valeur de cette fonction revient à assurer le meilleur profit compte tenu du gain généré par la vente des produits (CV), des dépenses inhérentes à leur fabrication vues sous l’angle d’un coût matière (CA), du coût de stockage (CS), du coût de production (CP) et du coût de rupture<sup>5</sup> (CR), ainsi que des pénalités pour le non-respect des consignes de production reçues des centres de décision de niveau supérieur.

Lorsque le centre de décision n’a pas de centre hiérarchiquement supérieur (son ensemble  $\vec{E}$  est vide), les paramètres  $\phi_p$  et  $\lambda_p$  sont mis à zéro.

En cherchant à maximiser le critère C, le modèle tend (si les conditions initiales et les capacités le permettent) vers la solution idéale suivante :

$$b_{r,r',p}(t) = 0 \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H$$

D’où, d’après (3) :

$$l_{r,r',p}(t) = d_{r',r,p}(t) \quad \forall r' \in \vec{E}, \forall r \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H$$

$$i_{r,p}(t) = 0 \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H$$

$$C_{\text{pénalités}} = 0$$

Le centre de décision cherche donc à éviter les ruptures pour satisfaire les clients en leur livrant la bonne quantité de produit. Ensuite, il cherche à minimiser les coûts de stockage en plaçant les niveaux de stock à zéro ainsi que les pénalités en respectant les consignes des centres de décision de niveau supérieur.

<sup>5</sup> Le coût de rupture exprime le manque à gagner ou les pénalités commerciales qu’engendre l’impossibilité de fournir les produits demandés.

La cible que constitue l'annulation des stocks correspond à un flux complètement tendu. Mais on peut aussi l'utiliser pour faire tendre les niveaux de stock vers des valeurs non nulles (ajout de nouveaux paramètres de niveaux de sécurité, ou niveaux nominaux).

### 3.4.3 Principe de fonctionnement du modèle de planification

Ce paragraphe s'attache à interpréter le modèle de planification présenté précédemment, de manière à clarifier son utilisation et son utilité au sein du centre de décision (un condensé du modèle est disponible à la fin de cette thèse, en annexe).

#### Etape 1 : définition du plan de livraison

Tout commence par la donnée la plus essentielle : la demande des clients. Celle-ci intervient, avec les livraisons des produits, dans la contrainte (3) sur l'expression des ruptures. Nous rappelons que les ruptures ne sont considérées que pour les produits destinés aux clients directs du centre de décision. Un des objectifs du modèle est d'éviter les ruptures et la contrainte (3) va donc définir les livraisons en minimisant les ruptures tout en vérifiant la contrainte (6) sur la capacité de transport.

#### Etape 2 : définition du plan de production

Les quantités à livrer apparaissent ensuite dans la contrainte (1) caractérisant l'évolution des stocks des produits sortant des ressources (i.e. les ressources livrant aux clients, donc les plus en aval dans la chaîne pilotée par le centre de décision). De la même façon, le modèle cherche à minimiser les stocks qui engendrent des coûts, en les faisant tendre vers zéro. Ceci permet alors de calculer les quantités nécessaires pour réapprovisionner les stocks et qu'il faut lancer en production : c'est le plan de production de la ressource. Celui-ci devra aussi vérifier la capacité de production de la ressource (contrainte (4)).

#### Etape 3 : définition du plan de réception

Le plan de production intervient aussi dans la contrainte (2) qui permet de calculer l'évolution des stocks des produits entrant dans la ressource, que le modèle cherche à minimiser. Elle permet surtout de calculer les besoins en produits entrants qu'il faut commander à la ressource-fournisseur. Dans cette étape, les niveaux de stock (d'entrée et de sortie) de la ressource doivent vérifier la contrainte (5) sur la capacité de stockage.

#### Etape 4 : définition du plan de livraison de la ressource-fournisseur

D'après la contrainte (7), l'activité de transport, supposée sans perte, est perçue comme un délai entre le plan de réception de la ressource-client, défini dans l'étape 3, et le plan de livraison de la ressource-fournisseur.

Ce plan étant défini, on revient à l'étape 2 pour définir le plan de production de la ressource-fournisseur.

Cette boucle (étapes 2, 3 et 4) calcule ainsi les divers plans en remontant de proche en proche les différentes ressources pilotées, et ce tant que la ressource-fournisseur est une ressource pilotée par le centre de décision. Enfin, le dernier plan de réception calculé définit la commande à passer aux fournisseurs externes, au délai de livraison près.

### 3.5 Les relations inter-centres de décision

Quelle que soit l'architecture de pilotage (cf. chapitre 2) dans laquelle il se situe, un centre de décision n'est jamais seul dans la chaîne logistique : il interagit avec les autres centres de décision de la chaîne, les clients, les fournisseurs. Ses propres décisions sont fonction de celles de ses interlocuteurs et ont elles-mêmes une influence sur celles de ses homologues. Il doit donc dialoguer avec ceux-ci afin de construire des décisions cohérentes pour piloter le système de production. Cette partie s'attache à préciser les échanges d'informations, liés au problème de planification, d'un centre de décision avec ses clients, fournisseurs, ressources internes et centres de décision de niveau supérieur, en utilisant les notations ensemblistes présentées dans ce chapitre.

Nous considérons donc, dans ce qui suit, un réseau de centres de décision, ce qui amène à expliciter les exposants  $n$  et  $s$  qui permettent d'identifier les centres émetteurs et consommateurs de l'information (cf. figure 3.3).

**Notons que les relations de transfert de flux d'information qui sont présentés ci-après doivent se comprendre ainsi : on affecte au membre de gauche la valeur du membre de droite.** Il ne s'agit donc pas d'égalités mathématiques, mais de relations d'affectation, suivant ainsi les conventions d'écriture propres aux langages informatiques.

#### 3.5.1 Relations horizontales : échange de type client - fournisseur

D'après le chapitre 2, deux centres de décision impliqués dans une relation client – fournisseur sont sur un même niveau décisionnel. Par ailleurs, nous avons fait l'hypothèse que tous les centres de décision d'un même niveau travaillent avec le même couple horizon / période.

Un centre de décision échange avec ses fournisseurs et clients les informations listées dans le tableau 3.1 et récapitulées par la figure 3.3.

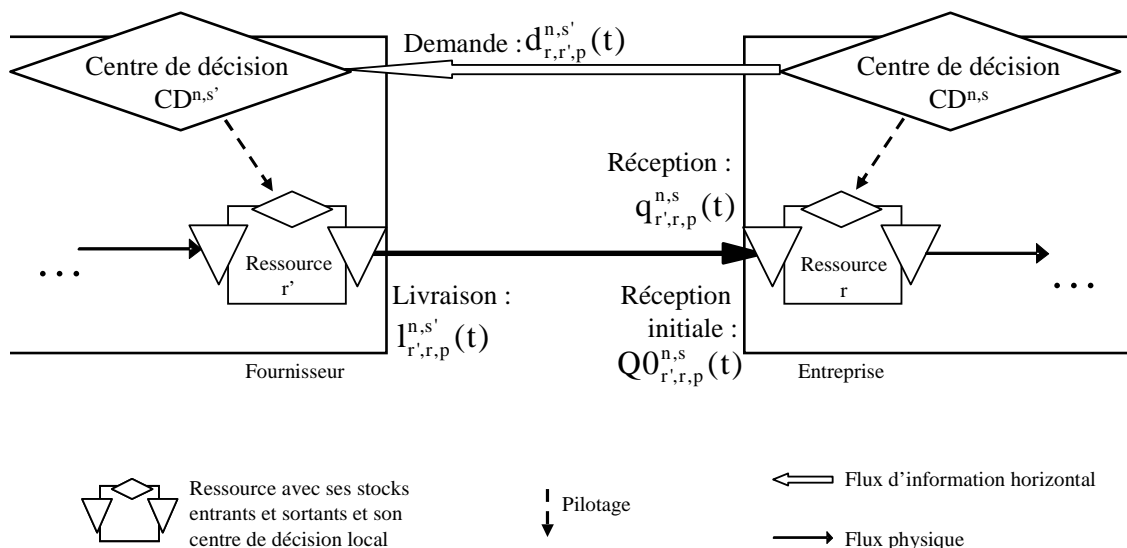


Figure 3.3 : Modélisation et notation utilisées pour une relation client-fournisseur



### 3.5.1.1 Processus de commande à un fournisseur : prise en compte du délai d'information

L'un des buts du modèle de planification du centre de décision  $CD^{n,s}$  est de calculer les besoins en composants pour ses ressources internes  $r$ , à acheter auprès de ses fournisseurs (ressource externe  $r'$ ). Le centre de décision  $CD^{n,s'}$  du fournisseur  $r'$  va percevoir la commande comme une demande, déterminée de la façon suivante :

$$d_{r,r',p}^{n,s'}(t) = \begin{cases} q_{r',r,p}^{n,s'}(t + DL_{r',r} + DI_{r,r'}) & \forall t \in \{1 \dots T - DL_{r',r} + DI_{r,r'}\} \\ 0 & \forall t \in \{T - DL_{r',r} + DI_{r,r'} + 1 \dots T\} \end{cases}$$

$$\forall s' \in \bar{E}^{n,s}, \forall r \in \check{E}^{n,s}, \forall r' \in \bar{E}_r^{n,s} \cap \check{E}^{n,s'}, \forall p \in \bar{P}_r \cap \bar{P}_{r'} \quad (16)$$

où  $DI_{r,r'}$  est le délai d'information, c'est-à-dire le délai de prise en compte et de traitement de la commande. Le traitement de la commande comprend l'activité de planification et éventuellement l'activité de production si le fournisseur ne travaille pas sur stock, mais à la commande. Dans notre cas, nous supposons que la production se fait en temps masqué, puisque le fournisseur reçoit des prévisions suffisamment longtemps à l'avance. Le centre de décision n'est pas nécessairement informé sur le détail des délais.

Nous appellerons délai d'approvisionnement la somme des délais de livraison (ou transport) et d'information. Dans la réalité, ce délai est cadré par négociation et il est généralement supérieur à la somme des délais techniques cités, en raison d'une marge de temps que se ménage le fournisseur pour faire face à ses propres difficultés de production.

La relation (16) est définie en deux temps : d'une part, la copie des besoins en composants au délai de livraison et d'information près, et d'autre part, la définition des besoins pour les dernières périodes de l'horizon  $H$  couvrant ces délais. Sur ces dernières périodes, la demande est arbitrairement fixée à zéro (on pourrait tout aussi bien choisir une autre valeur, comme par exemple la demande moyenne sur les autres périodes).

Pour résumer, lors de l'élaboration de la commande, le centre de décision doit donc prendre en compte le délai d'approvisionnement, comme le montre la figure 3.4. Sur cette figure, deux exemples de transmission des besoins sont explicités (flèches + cases hachurées). Dans la réalité, c'est l'ensemble du plan qui est travaillé selon ce principe.

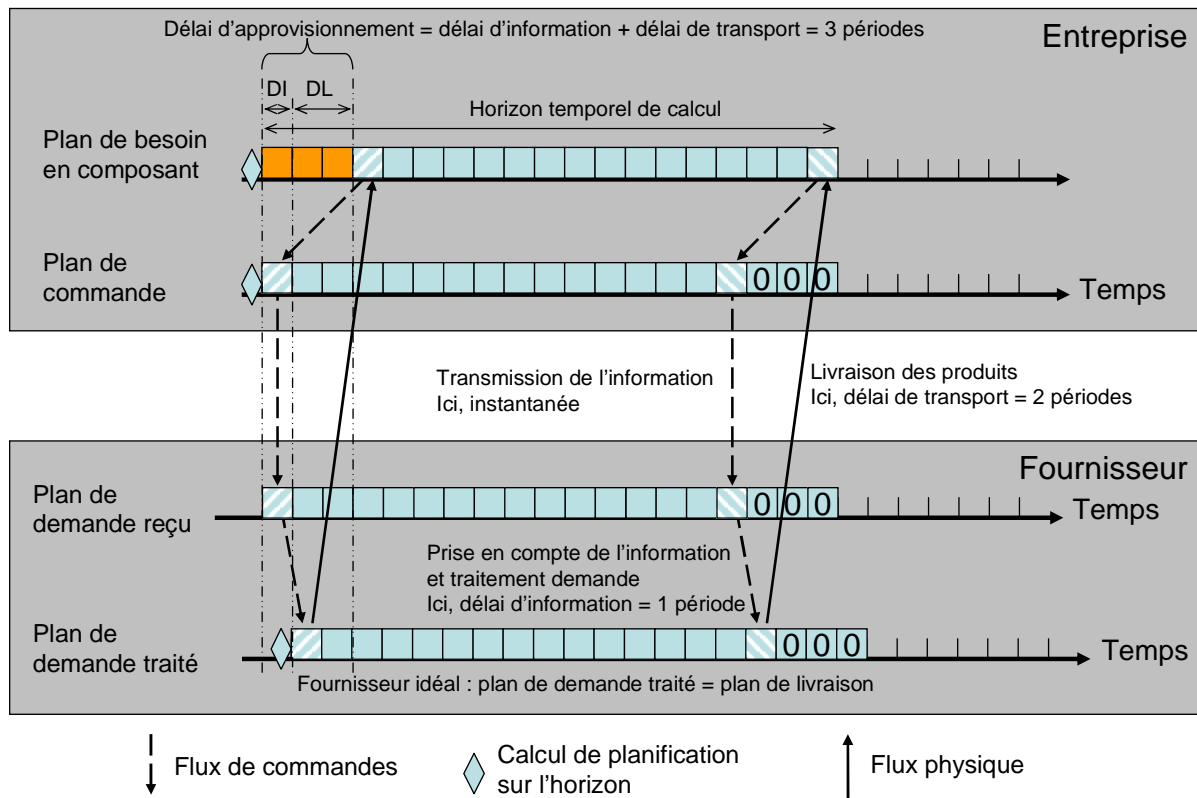


Figure 3.4 : Calcul et transmission d'une commande à un fournisseur

Le plan de commande est ensuite transmis au fournisseur. La durée de la transmission est supposée nulle ou négligeable par rapport à la durée de la période élémentaire. Le fournisseur traite alors cette demande au bout d'un certain temps : le délai d'information.

A noter que, dans nos simulations, un centre de décision considère toujours que ses fournisseurs sont idéaux : ils livrent la quantité demandée à la date demandée. Dans ces conditions, le plan de livraison correspond exactement au plan de demande traité. Le cas de livraisons partiellement conformes aux commandes reste en dehors de nos hypothèses de travail.

### 3.5.1.2 Informations concernant les futures livraisons au client

Le modèle de planification a besoin de connaître, au nombre des conditions initiales, les en-cours de transport des quantités à approvisionner. Un fournisseur doit donc renseigner son client sur les quantités de produits qui viennent de partir de chez lui et qui ne sont pas encore arrivés jusqu'au client. Ainsi, juste avant de faire son calcul de planification, le centre de décision  $CD^{n,s}$  reçoit de son fournisseur  $CD^{n,s'}$  les en-cours de transport, c'est-à-dire les futures quantités de composants approvisionnés :

$$Q0_{r',r,p}^{n,s}(t) = I_{r',r,p}^{n,s'}(t - DL_{r',r}) \quad \forall s' \in \bar{E}^{n,s}, \forall r \in \bar{E}^{n,s}, \forall r' \in \bar{E}_r^{n,s} \cap \bar{E}^{n,s'}, \forall p \in \bar{P}_r \cap \bar{P}_{r'}, \forall t \in \{1..DL_{r',r}\} \quad (17)$$

Le fournisseur peut aussi communiquer tout le plan de livraison envers l'entreprise, qui pourra alors vérifier si les besoins qu'elle va calculer dans sa prochaine planification sont en accord avec les livraisons de son fournisseur.

### 3.5.2 Relations verticales : échange entre centres de décision de niveaux successifs

Suivant l'architecture de pilotage de la chaîne logistique (cf. chapitre 2), plusieurs niveaux décisionnels sont possibles. Les centres décisionnels d'un niveau supérieur, ayant une vision plus globale de la chaîne, peuvent mieux coordonner et donc guider par des « ordres » les centres décisionnels de leurs ressources internes. Ceux-ci, étant plus proches du flux physique, doivent aussi informer régulièrement leur(s) centre(s) de décision hiérarchique(s) sur l'état du système de production.

Les notations utilisées en situation de relation hiérarchique, c'est-à-dire entre centres de décisions de deux niveaux décisionnels différents, sont rappelées sur la figure 3.5.

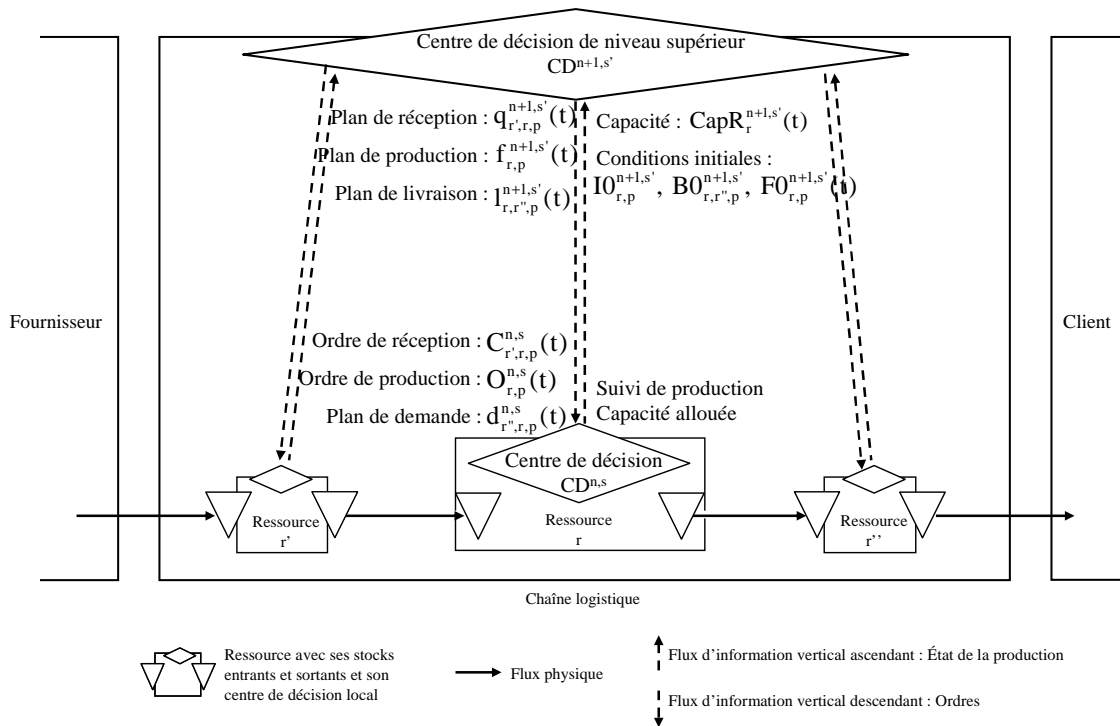


Figure 3.5 : Modélisation et notation utilisées pour une relation hiérarchique

#### 3.5.2.1 Ordres pour les ressources internes d'un centre de décision

Un centre de décision de niveau  $n+1$  doit fournir, à l'intention de chaque centre de décision de niveau  $n$  qu'il pilote, l'ensemble des informations nécessaires à ceux-ci pour maîtriser leur activité, à savoir :

- les plans de réception (ou quantités de composant à recevoir sur l'horizon),
- les plans de production,
- les plans de livraison.

- Comment ces informations sont-elles perçues par le centre de décision d'une ressource de niveau  $n$  ?

Les demandes sur lesquelles se basent les centres de décision du niveau inférieur sont déduites des plans de livraison issus de la prise de décision au niveau supérieur. La demande étant le paramètre d'où commence tout calcul de planification, il faut bien la définir.

Dans une relation simple fournisseur-client, la demande pour un centre de décision provient directement de ses propres clients. Dans une relation multi-niveaux, c'est le niveau supérieur

qui analyse et traite la demande des clients et en déduit une consigne de production pour ses ressources internes. Ainsi le plan de livraison d'une ressource-fournisseur  $r'$  vers une ressource-client  $r$ , défini par le centre de niveau  $n+1$ , va-t-il servir à définir la demande en produit sortant de la ressource  $r'$  :

$$d_{r,r',p}^{n,s}(t) = \sum_{s' \in \tilde{E}^{n,s}} l_{r',r,p}^{n+1,s'}(t) \quad \forall r \in \tilde{E}^{n,s}, \forall r' \in \overleftarrow{E}_r^{n,s}, \forall p \in \vec{P}_{r'}, \forall t \in H \quad (18)$$

Quant aux plans de production et de réception des centres de niveau  $n+1$ , ils vont être interprétés par le centre de décision  $CD^{n,s}$  respectivement comme les ordres de production et de réception, représentés par les équations suivantes :

$$O_{r,p}^{n,s}(t) = \sum_{s' \in \tilde{E}^{n,s}} f_{r,p}^{n+1,s'}(t) \quad \forall r \in \tilde{E}^{n,s}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (19)$$

$$C_{r',r,p}^{n,s}(t) = \sum_{s' \in \tilde{E}^{n,s}} q_{r',r,p}^{n+1,s'}(t) \quad \forall r \in \tilde{E}^{n,s}, \forall r' \in \overleftarrow{E}_r^{n,s}, \forall p \in \vec{P}_{r'}, \forall t \in H \quad (20)$$

- Comment ces ordres (en production et réception) sont-ils pris en compte dans le modèle du centre de décision d'une ressource de niveau  $n$  ?

Dans ce paragraphe, on argumente la partie  $C_{pénalités}$  du critère d'optimisation.

Dans le modèle d'un centre de décision d'une ressource de niveau  $n$ , les ordres en production et en réception peuvent apparaître :

- soit sous forme de contraintes (on impose par exemple que le plan de réception soit celui calculé par le centre hiérarchique). L'autonomie du centre de décision local est alors réduite par l'ajout dans son modèle de ce type de contraintes, dite « dures ».
- soit par l'ajout d'éléments dans le critère cherchant à minimiser les écarts entre l'ordre du centre hiérarchique et le plan calculé localement. Chacun de ces éléments serait pondéré par une valeur, déterminée par un expert, laissant plus ou moins d'autonomie à un centre de décision local. La contrainte est dite « molle ».

Les ordres de production ne peuvent pas se mettre sous la forme d'une contrainte dure, car, si tel était le cas, une ressource pilotée par plusieurs centres de niveau supérieur pourrait recevoir une somme de consignes supérieure à sa capacité de production, rendant alors impossible la résolution du problème de planification.

Enfin, le fait d'imposer le plan de réception dans le modèle n'est pas judicieux, car d'une part, la production serait nécessairement limitée par les arrivées de composants, et, d'autre part, en cas d'arrêt imprévu de la production, les composants continueraient à arriver et engorgeraient les stocks qui sont de capacité limitée (contrainte 5), empêchant ainsi le modèle de trouver une solution.

En conclusion, les ordres de production et de réception ne peuvent être pris en compte que sous forme de contrainte molle dans le critère. Les coefficients  $\phi_p$  et  $\lambda_p$  permettent de pondérer les pénalités entre elles et vis-à-vis des autres coûts du critère.

### 3.5.2.2 Retours d'information vers un centre de décision de niveau supérieur

Le centre de niveau  $n+1$  a besoin de connaître toutes les informations figurant dans le tableau 3.1, en particulier les informations de suivi de production (stocks, ruptures, disponibilité des ressources, ...).

Un centre de décision de niveau  $n+1$  considère qu'il a trouvé une bonne planification lorsque toutes ses ressources internes peuvent elles-mêmes, au niveau  $n$ , planifier leur production sans rupture et lorsque toutes ont accepté les plans de réception, assurant ainsi la coordination du flux physique sur toute la chaîne. Si une ressource de niveau  $n$  reçoit ses consignes de plusieurs centres de niveau hiérarchique supérieur, des négociations sont nécessaires afin de rendre les plans cohérents. Nous étudierons cette situation au chapitre 5.

Le centre de niveau supérieur a donc un rôle de coordination d'acteurs de la chaîne. La cohérence de la planification du flux physique se construit par une négociation, laissant ainsi une certaine part d'autonomie aux centres de décision locaux.

Il faut par ailleurs préciser que le centre de niveau  $n+1$  fait son calcul à partir des capacités de production des ressources de niveau  $n$ . Un centre de décision de niveau  $n$  doit donc informer le centre commanditaire de niveau  $n+1$  de la part de sa capacité totale qu'il met à sa disposition. Un centre de décision  $CD^{n,s}$  peut par exemple partitionner sa capacité en parts égales pour chaque centre commanditaire de niveau  $n+1$  :

$$\text{CapR}_r^{n+1,s'}(t) = \frac{1}{\text{Card}(\hat{E}^{n,s})} \text{CapR}_r^{n,s}(t) \quad \forall s' \in \hat{E}^{n,s}, \forall r \in \check{E}^{n,s}, \forall t \in H \quad (21)$$

Cette équation évoluera dans le chapitre 5, notamment dans le cas d'une ressource partagée entre plusieurs chaînes logistiques.

## 3.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté en détail le modèle analytique que nous avons établi pour la planification des activités d'une chaîne logistique. Générique, ce modèle a été conçu en intégrant les principaux facteurs techniques et économiques de la production et de la logistique, et de façon à toujours fournir une solution, avec éventuellement, en cas de situation sur-contrainte, des ruptures de stock.

Le modèle analytique est générique et peut être appliqué dans tout centre de décision, quels que soient son niveau et son rang dans l'architecture de pilotage de la chaîne. Il contribue à une bonne interopérabilité entre les acteurs grâce à :

- la mise en exergue des invariants de la problématique de planification pour tous les acteurs partenaires,
- la configurabilité du modèle global de la chaîne logistique, facilitée par les notations ensemblistes et la compatibilité immédiate des modèles locaux en interaction au sein de la chaîne.

Cependant, le modèle reste « modelable » par le centre de décision, puisque ce dernier définit un certain nombre de paramètres traduisant sa propre politique de gestion et ses préférences (coefficients pondérateurs dans le critère, coûts de rupture, équation de répartition de la capacité (21), ...). Tous ces paramètres sont en quelque sorte des curseurs que chaque décideur peut fixer à sa guise.

Le modèle a été implémenté sur le logiciel Xpress-MP et utilisé pour des campagnes d'expérimentation dont l'exploitation fait l'objet des chapitres 4 et 5.

En phase de validation du modèle, les résultats ont été comparés avec ceux du logiciel IO de la société Cesium. Sur un scénario de surcharge ponctuelle de production, IO trouve une solution mais avec de nombreux retards de production, alors que notre modèle parvient à trouver une solution sans retard. En modifiant manuellement la solution du logiciel IO, nous avons réussi à retrouver la solution de notre modèle. Donc le logiciel IO trouve une solution non optimale.

Rappelons aussi que notre modèle n'est qu'un outil permettant de trouver la solution optimale en fonction des informations qui lui sont données. L'utilisateur reste libre de choisir cette solution ou de la modifier.

Grâce à l'informatisation de notre modèle, nous pouvons expérimenter différents pilotages vus pour une même chaîne logistique et comparer leurs performances face à des incertitudes sur les informations (robustesse du modèle) ou face à des aléas (réactivité de la planification).

Enfin, le modèle peut aussi être utilisé au niveau stratégique pour simuler une nouvelle architecture de pilotage ou une modification dans la structure physique d'une chaîne existante (changement de fournisseurs, nouveau produit par exemple). A cet effet, toutes les informations listées dans le tableau 3.1 peuvent être modifiées, ainsi que les ensembles définis au § 3.2.1.1.

De nombreuses perspectives d'amélioration et d'extension du modèle peuvent être imaginées, comme par exemple :

- la prise en compte d'un taux de rebut dans la production,
- la prise en compte de stocks de sécurité,
- la prise en compte des nomenclatures divergentes,
- l'agrégation/désagrégation du temps, des capacités de ressources, des produits entre niveaux hiérarchiques.

L'extension à la planification hiérarchique (au sens de l'agrégation de données) est immédiatement réalisable, sur la base des modèles d'agrégation existant au LAPS (Lecompte-Alix 2001, Zolghadri 1998), qui permettent un affinage progressif de la planification d'un niveau à l'autre, en reliant dans un continuum de modèles les décisions de macro-planification aux décisions finales d'ordonnancement, contrairement à la vision traditionnelle dans les entreprises qui sépare la partie planification de la partie ordonnancement.



---

## Partie 2

# Evaluation de performance de pilotage de chaîne logistique

---





---

## Chapitre 4

# Analyse de performances – robustesse et réactivité du pilotage

---

Sommaire :

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1   | Introduction .....   | 106 |
| 4.2   | Objectifs de l'analyse .....   | 106 |
| 4.2.1 | Mesure de la performance de la chaîne .....                          | 106 |
| 4.2.2 | Approche comparative des différentes architectures de pilotage.....  | 107 |
| 4.3   | Présentation du cas d'étude .....                                    | 108 |
| 4.3.1 | Définition du cas-type : entretiens industriels préalables.....      | 108 |
| 4.3.2 | Description de la structure physique et des données techniques.....  | 110 |
| 4.3.3 | Les problématiques considérées .....                                 | 114 |
| 4.4   | Objectifs et protocoles d'expérimentation .....                      | 114 |
| 4.4.1 | Définition des architectures de pilotage appliquées au cas-type..... | 115 |
| 4.4.2 | Données initiales .....  | 117 |
| 4.4.3 | Présentation de l'outil de simulation.....                           | 117 |
| 4.5   | Etude de la robustesse .....   | 119 |
| 4.5.1 | Scénarios d'expérimentation .....                                    | 119 |
| 4.5.2 | Résultats des campagnes expérimentales .....                         | 121 |
| 4.5.3 | Analyse des résultats .....  | 123 |
| 4.5.4 | Conclusion sur l'étude de la robustesse .....                        | 128 |
| 4.6   | Etude de la réactivité .....   | 129 |
| 4.6.1 | Scénarios d'expérimentation .....                                    | 129 |
| 4.6.2 | Les résultats de l'analyse de réactivité.....                        | 132 |
| 4.6.3 | Analyse des résultats .....  | 135 |
| 4.6.4 | Conclusions sur l'étude de la réactivité.....                        | 141 |
| 4.7   | Conclusion du chapitre.....  | 142 |

## **4 Analyse de performances - robustesse et réactivité du pilotage**

### **4.1 Introduction**

Le modèle analytique de planification présenté au chapitre 3 va maintenant permettre l'analyse comparative des modes de pilotage des chaînes logistiques. La généralité du modèle de planification, en systématisant la prise de décision et en standardisant son paramétrage, permet de construire des architectures de pilotage et de simuler des stratégies de planification en vue de l'évaluation de performances. Pour ce faire, il reste à définir plus précisément :

- les objectifs de l'analyse : il s'agit d'évaluer les performances des chaînes logistiques au regard du type de pilotage mis en œuvre. Les différentes architectures de pilotage seront étudiées plus particulièrement sous l'angle de la robustesse et de la réactivité de la planification face aux sollicitations de l'environnement commercial et aux aléas de fonctionnement.
- et le contexte d'étude : l'analyse s'appuie sur une série d'expérimentations réalisées autour d'un cas d'application académique. Ce cas d'étude a vocation de proposer une structure de chaîne logistique de complexité maîtrisée posant une classe significative de problèmes industriels, tout en limitant le terrain d'expérimentation.

Ce faisant, les résultats issus de l'analyse seront inévitablement liés au paramétrage du cas d'application, mais permettront d'extraire quelques tendances générales en termes de performances.

### **4.2 Objectifs de l'analyse**

#### **4.2.1 Mesure de la performance de la chaîne**

La performance d'une chaîne logistique est renseignée par l'ensemble des mesures de réalisation des objectifs que se fixent les entreprises partenaires. Ces résultats sont mesurés localement au sein de chaque entreprise et se déduisent la plupart du temps d'une comparaison entre :

- les informations collectées, révélatrices du déroulement réel des activités de transformation du flux physique,
- et celles issues des plans prévisionnels visant à organiser par anticipation ces mêmes activités.

Les résultats peuvent également traduire le non respect des engagements liant les fournisseurs à leurs clients, concrétisé irrémédiablement par des ruptures de stocks de produits finis à l'échéance prévue.

La fonction de coût (ou critère d'optimisation) définissant la stratégie de planification, proposée dans le modèle analytique décrit au chapitre 3, prend en compte ces différentes considérations. Les ruptures de produits finis sont appréciées sous la forme de coûts induits par l'absence de matières, venant s'ajouter aux autres coûts « classiques » (coût de production, de stockage, d'achat matières). Ces différents coûts sont à la base du référentiel de

mesure de performances utilisé dans la suite de ce chapitre pour réaliser l'analyse comparative des différentes architectures de pilotage.

Ces indicateurs de coût sont complétés par le profit de chaque acteur de la chaîne. Le profit global du réseau est obtenu en sommant les profits de chaque acteur.

Pour évaluer la performance des différents pilotages, nous allons nous placer en tant qu'observateur de l'ensemble du réseau d'entreprises.

Dans tous les cas, ces mesures comparatives sont calculées sur un même horizon.

#### **4.2.2 Approche comparative des différentes architectures de pilotage**

L'analyse que nous avons menée vise à mettre en exergue les avantages et inconvénients incombant à chaque type d'architecture de pilotage (centralisée, distribuée, mixte) pour faire face à des variabilités types elles-mêmes simulées. Plus précisément, il s'agit d'étudier le comportement global de chaque architecture de pilotage sous l'angle de la robustesse de décision et de la réactivité aux aléas de fonctionnement, notions que nous définissons ci-dessous.

##### *Définition de la robustesse*

La définition de la robustesse peut varier suivant le domaine scientifique qui s'y intéresse. En Automatique, discipline de référence des problèmes de pilotage, la robustesse est la capacité de la commande du système à assurer le respect des consignes, en dépit des facteurs perturbants et des incertitudes. Cette notion s'est étendue depuis au problème de planification : Van Landeghem et Vanmaele (2002) qualifient un plan de robuste si et seulement si ce dernier fournit une faible dispersion de ses caractéristiques malgré les fluctuations perturbatrices de facteurs non contrôlables. Appliquée à un contexte de planification multi-niveaux avec agrégation de données, la robustesse traduit la possibilité d'obtenir, à partir d'une consigne de niveau agrégé, une solution de planification à un niveau détaillé (Hétreux, 1996). L'optimisation robuste est alors la capacité à fournir des solutions en optimisant une fonction exprimant un niveau de service ou de risque pour le décideur, ces solutions étant progressivement moins sensibles à la valeur des données dans un ensemble de scénarios (Mulvey et al., 1995, Leung et al., 2006) permettant au système de commande d'identifier les réalités du système piloté.

##### *Définition de la réactivité*

De manière générale, la réactivité d'un système de pilotage traduit sa rapidité de réaction face à l'apparition d'un aléa de fonctionnement ou aux sollicitations non prévisibles de l'environnement. La réactivité se mesure souvent par le délai séparant le constat de l'événement perturbateur et la mise en œuvre effective de la solution ad hoc. En planification, la réactivité est la capacité à préserver un lien entre la performance de l'entreprise et l'adaptation de la production aux besoins des clients (Estampe et al., 1999, Morana et Paché, 2000). Cela sous-entend trois éléments : rester vigilant et être capable d'adapter la charge aux besoins des clients, réduire le délai de réponse face à une demande exceptionnelle des clients, et avoir la capacité à s'adapter à tout événement inattendu, tant exogène (aléa commercial) qu'endogène (émanant du système piloté).

En résumé, nous aborderons la notion de robustesse en tant qu'aptitude d'une solution de planification à ne pas être trop sensible aux variations de certaines données, telles que la diminution d'une capacité, l'augmentation de la demande,... L'objectif sous-jacent est d'évaluer la sensibilité de la solution optimale de planification aux incertitudes sur les données, révélant ainsi la plus ou moins grande aptitude des différentes architectures de pilotage à assurer la performance de robustesse.

La réactivité est, quant à elle, approchée sous l'angle de la rapidité à corriger un plan de production lors de l'apparition d'un aléa sur le flux physique, détecté par la différence entre le plan prévisionnel et le plan observé. Un aléa peut correspondre par exemple à une panne de machine ou à un défaut d'approvisionnement.

### **4.3 Présentation du cas d'étude**

Afin de pouvoir analyser les différentes architectures de pilotage et évaluer leur impact sur les performances d'une chaîne logistique, nous introduisons un cas d'étude de réseau d'entreprises. Cet exemple (appelé par la suite « cas-type ») est développé sur la base d'une analyse bibliographique complétée d'une étude des pratiques industrielles réalisée auprès d'entreprises travaillant dans des secteurs d'activités divers. Dans le but d'éviter une inutile explosion des données et une difficulté par trop quantitative d'analyse des résultats d'expérimentation, nous avons choisi de structurer notre démarche d'analyse autour d'un cas de chaîne logistique de **complexité réduite**.

#### **4.3.1 Définition du cas-type : entretiens industriels préalables**

Dans le cadre d'un travail collaboratif multi-laboratoires (LAAS-CNRS (Toulouse), LAPS (Bordeaux), LGP (Tarbes), CERTOP (Toulouse)), des entretiens auprès de plusieurs grandes entreprises donneuses d'ordres ont été effectués (François et Galasso, 2005). Trois de ces entreprises sont issues du secteur aéronautique, une autre de la fabrication de systèmes complexes de conditionnement d'air et une dernière issue de l'industrie des semi-conducteurs pour les marchés de l'automobile et des télécommunications. En dépit de leur nombre limité<sup>6</sup>, ces études de cas industriels préalables nous ont permis d'identifier certaines problématiques de gestion de chaînes d'approvisionnement.

Les entreprises consultées sont impliquées dans des réseaux de partenariat international, souvent en liaison directe avec le client final (sans réseau de distribution). Ces entreprises font partie de chaînes logistiques complexes du fait de la grande variété de produits finis fabriqués. Chaque entreprise a recours à l'achat de fournitures auprès de partenaires industriels fournisseurs de rang 1, sans vision de l'activité de production au-delà (en amont) de ces fournisseurs.

Chaque fournisseur est sélectionné pour son savoir-faire technique, ses prix, mais aussi, pour sa maîtrise de la production (aptitude à respecter les délais, les quantités demandées, ...). La gestion de production s'appuie sur des approches standard type MRP2, aidée par des outils informatiques capables d'intégrer les prévisions de demande du client pour assurer un bon niveau d'anticipation dans la planification des activités de production.

---

<sup>6</sup> Eisenhardt (Eisenhardt, 1989) montre qu'un nombre d'études de cas compris entre 4 et 10 suffit généralement à identifier les principales politiques de gestion industrielle.

Chaque acteur de la chaîne logistique a pour objectif principal la satisfaction des dates de livraison sous peine de fortes pénalités de retard. Les politiques de pilotage mises en œuvre dans les entreprises sont structurées autour des familles de produits et découlent d'une contrainte de satisfaction du client par des livraisons en temps et en heure. Ainsi, les relations avec les fournisseurs reposent sur des contrats définissant un premier cadre de travail dans lequel le donneur d'ordres, en fonction de la demande client, va négocier les livraisons en composants. Cette contractualisation précise en général la répartition des risques et pallie la variabilité de la demande sur les marchés par l'expression d'une quantité modulable de produits commandés, comprise entre des valeurs minimales et maximales et livrable à des cadences prédéfinies.

Dans cette phase de contractualisation, des contraintes liées aux prix de vente et à leur diminution progressive dans le temps, peuvent être négociées. Cela pousse les entreprises vers une logique d'amélioration continue grâce à laquelle elles partageront leur savoir-faire et leurs méthodes. Une fois cette première phase terminée, le pilotage proprement dit de la chaîne se traduit généralement par la transmission de demandes d'approvisionnement de chaque entreprise vers ses fournisseurs immédiats. Ces demandes se réfèrent à des horizons temporels divers. Ainsi, certaines entreprises distinguent-elles i) un horizon ferme, à court terme, pour les appels de livraisons définitifs, ii) un horizon flexible à moyen terme dans lequel le fournisseur prévoit, dans sa planification, une variation éventuelle des quantités commandées dans les limites fixées par le contrat, sachant par ailleurs que les coûts induits par le débordement de ces limites sont assumés par le donneur d'ordres, iii) ainsi qu'un horizon prévisionnel, à long terme, qui donne une vision simplement indicative de l'évolution de la demande. Il est à noter qu'une fois ces quantités définies, chaque fournisseur a la possibilité d'organiser sa production selon son propre mode de fonctionnement. Cette indépendance de chaque maillon de la chaîne constitue un point essentiel pour sa flexibilité. En définitive, une chaîne logistique s'apparente – pour les cas examinés – à un ensemble de relations client - fournisseur au sein desquelles les entreprises ne cherchent généralement pas à maîtriser la gestion de production de leurs fournisseurs ni d'assumer le rôle de coordinateur de la chaîne. Les entreprises partenaires favorisent néanmoins le partage de l'information en mettant pour ce faire à leur disposition mutuelle des moyens matériels (systèmes informatiques) et/ou humains (intervention de consultants). Il semble qu'aujourd'hui une entreprise soit plus encline à s'investir dans une relation de coopération avancée avec ses fournisseurs que de tendre vers une gestion globale de l'activité tout au long de la chaîne logistique. Elle recherche en cela une amélioration permanente de sa propre activité tout en responsabilisant les fournisseurs quant au respect absolu de leurs engagements partenariaux.

Dans le cas où un partenaire a un rôle dominant (e.g. grand donneur d'ordres dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique,...), celui-ci instaure une hiérarchie dans la chaîne logistique par son ascendant commercial sur l'ensemble des partenaires, qui s'exprime par la répercussion systématique sur ses fournisseurs des variations de la demande de ses propres clients, en termes de modifications plus ou moins inopinées ou d'annulations de commandes. Une telle préminence induit souvent un partage d'information en termes de suivi de production, afin que le donneur d'ordres puisse disposer d'une vision complète sur l'état de la chaîne, et ainsi anticiper les problèmes.

Au bilan, nos consultations, jointes aux analyses issues de la littérature (cf. §1.3 et §1.4), nous amènent à énoncer les caractéristiques environnementales les plus courantes d'une entreprise au sein d'une ou de plusieurs chaîne(s) :

- 1) quelques centaines de fournisseurs dont plusieurs pour un même composant,
- 2) une multitude de clients aux profils de consommation divers,
- 3) un recours fréquent à la sous-traitance,
- 4) l'appartenance éventuelle d'une entreprise à plusieurs chaînes logistiques,
- 5) un nombre élevé de rangs dans la chaîne,
- 6) une autonomie locale de gestion, mais un partage possible d'informations.

Ces caractéristiques seront reprises, au facteur d'échelle près, pour une large partie dans la définition du cas-type<sup>7</sup>, afin de représenter les caractéristiques essentielles des chaînes logistiques, tout en gardant à l'esprit la nécessité de travailler sur un modèle de chaîne à complexité maîtrisée.

### 4.3.2 Description de la structure physique et des données techniques

Pour la définition de notre cas-type, nous avons considéré une structure physique permettant, au plus simple, d'évaluer les principales architectures de pilotage et leurs performances.

En règle générale, la gestion des **transports** entre les partenaires d'une chaîne logistique peut se faire à l'initiative des fournisseurs de matière ou des consommateurs, mais peut aussi s'appuyer sur un prestataire indépendant des entreprises de la chaîne. Pour notre part, nous considérons les transports sous la forme de délais mobilisant des ressources à **capacité limitée**. Il était en effet important à nos yeux de ne pas ignorer la contrainte technique et économique de transport dans la gestion des chaînes logistiques.

Le cas-type (figure 4.1) se caractérise, dans le domaine du meuble, par 5 entreprises (ou «entités») regroupées en trois catégories principales (Scieries, Assembleur, Peintre) répondant aux sollicitations d'un ensemble de clients finaux (Cl) et travaillant avec plusieurs fournisseurs (Fo1, Fo2, Fo3, Fvs, Fpt). Fo1 à Fo3 fournissent des billes de bois, Fvs est fournisseur de vis, Fpt approvisionne en peinture.

Nous mettons en scène deux chaînes logistiques (i.e. réalisant deux familles de produits).

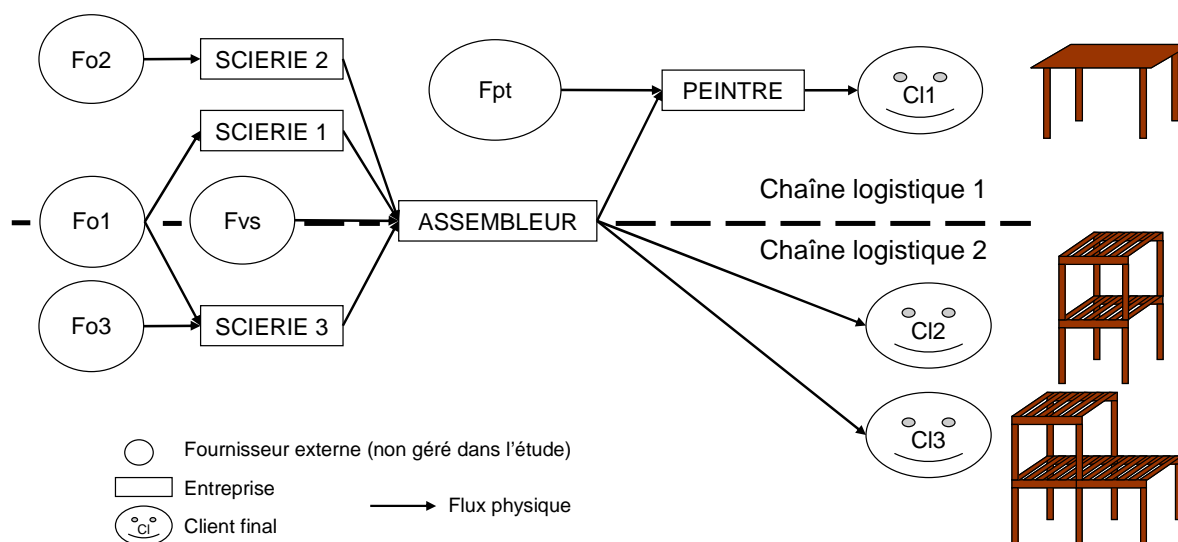


Figure 4.1 : Structure physique du cas-type

<sup>7</sup> Le recours à la sous-traitance n'est pas pris en compte dans le cas-type, mais peut être considéré sans modification importante.

Plus précisément, la chaîne logistique 1 comprend les fournisseurs Fo1, Fo2, Fvs et Fpt, les scieries 1 et 2 et les entreprises d'assemblage et de peinture. Les clients de cette chaîne sont représentés par l'entité Cl1 (éventuellement assimilable à un entrepôt). La seconde chaîne logistique comprend les fournisseurs Fo1, Fo3 et Fvs, et l'entreprise d'assemblage. Les produits sont commandés par les clients Cl2 et Cl3. Les entités Fo1, Fvs et Assembleur sont donc communes aux deux chaînes logistiques : celles-ci travaillent conjointement pour les deux chaînes. Chacune des deux chaînes est impliquée dans la fabrication d'un produit (ou d'une famille de produits) bien spécifique. La première chaîne produit des tables en bois peintes. La seconde produit une famille de meubles se décomposant en deux sous-familles : « meuble simple » et « meuble grand ». Les nomenclatures arborescentes de ces produits sont présentées sur les figures 4.2 et 4.3, avec les coefficients de nomenclature.

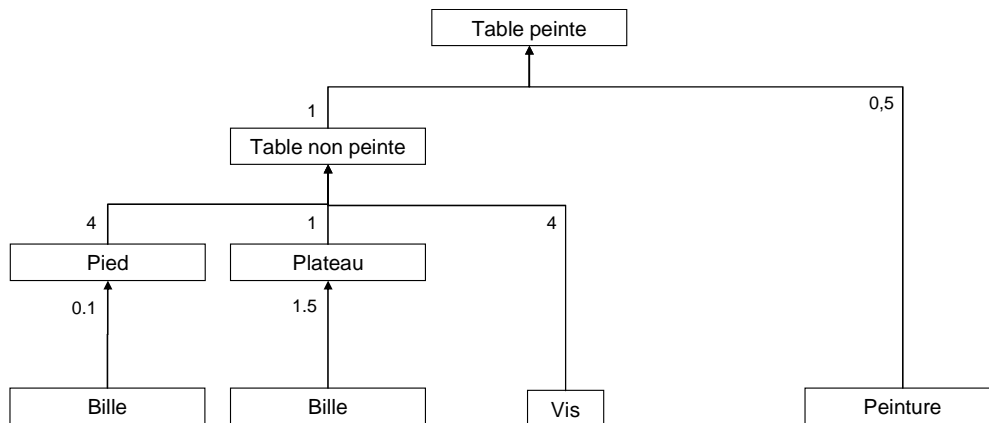


Figure 4.2 : Nomenclature de la table peinte

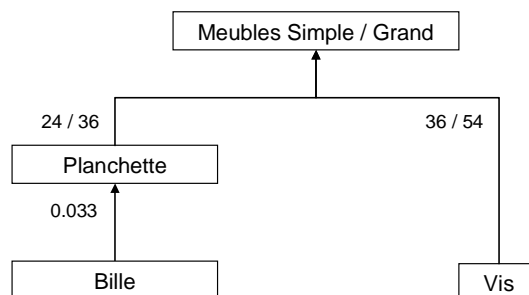


Figure 4.3 : Nomenclature des meubles simple et grand

L'ensemble des données relatives au cas-type, nécessaires à la planification des activités de production au sein de la chaîne logistique est synthétisé dans le tableau 4.1. On y trouve trois types de données :

- les caractéristiques propres aux produits,
- les caractéristiques propres aux fournisseurs des produits, liées à la production et au stockage des matières,... Notons que les billes de bois sont travaillées dans les trois scieries pour l'obtention des pieds, plateaux, et planchettes ; l'assembleur exécute le montage des produits « tables » et « meubles » ; le peintre fait la finition de décoration sur les « tables » exclusivement.
- les caractéristiques propres aux clients, destinataires des articles transportés, notamment les prix de vente (ou prix d'achat, selon le point de vue du partenaire), ainsi que les données relatives au stockage et au transport des matières.



Les notations utilisées dans le modèle de planification sont rappelées pour chaque paramètre. Le coût unitaire de stockage apparaît par deux fois dans le tableau, montrant une différenciation possible de coût, selon que la matière est stockée chez le fournisseur ou le client.

De plus, nous faisons les hypothèses suivantes :

- Les entreprises en charge de produire et livrer les fournitures (billes, vis et peinture) ont un comportement idéal ; elles fournissent systématiquement les matières dans les délais et les quantités négociés ; de fait, leurs capacités (production, stockage et transport) sont considérées comme infinies, et seuls les prix de vente des matières, les délais de livraison (incluant les autres délais techniques tels que le délai de production) et les données relatives au stockage chez le client sont ainsi définis.
- La capacité de production de l'assembleur est globalisée pour l'ensemble de ses produits.
- Les capacités de stockage sont identiques pour tous les produits.
- Un seul type de produit est transporté à la fois (pas de transport multi-produits). C'est pourquoi tous les coefficients représentant les « quantités de ressource consommée par unité de produit transporté » sont égaux à 1. La valeur de la capacité de transport représente alors le nombre maximal de produits transportables par période.

| Produit(s)       | Quantité de ressource nécessaire à la production d'une unité de produit (charge unitaire) | Quantité de ressource de stockage consommée par unité de produit stocké (volume) | Quantité de ressource consommée par unité de produit transporté (volume) | Fournisseur | Capacité de production (produits/jour) | Délai de production (jours)                            | Coût unitaire de production (UM)                 | Capacité de stockage (volume) | Coût unitaire de stockage (UM) | Coût unitaire de rupture (UM) | Client | Coût unitaire d'achat ou prix unitaire de vente (UM) | Coût unitaire de stockage (UM) | Capacité de transport à destination du client (volume) | Délai de livraison au client (jours) |
|------------------|---|--|--|-------------|--|--|--|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------|--|--------------------------------|--|--------------------------------------|
|                  | $\alpha_p$  | $\delta_p$   | $\beta_p$  |             | CapR <sub>r</sub>                      | DP <sub>r,p</sub>                                      | CP <sub>r,p</sub>                                | CapS <sub>r</sub>             | CS <sub>r,p</sub>              | CR <sub>r,p</sub>             |        | CA <sub>r,p</sub> / PV <sub>r,p</sub>                | CS <sub>r,p</sub>              | CapT <sub>r,t'</sub>                                   | DL <sub>r,t'</sub>                   |
| Bille de bois    | Non étudié  | 3,00   | Non étudié   | Fo1         | Capacité infinie                       | Délai de production intégré dans le délai de livraison | Coût de production intégré dans le prix de vente | Capacité infinie              | Non étudié                     | Pas de rupture                | Sc1    | 50,00  | 1,00                           | Capacité infinie                                       | 15                                   |
| Vis              |   |  |  | 0,01        |  |  |  |                               |                                |                               | Fo2    | Sc3  |                                |  | 50,00                                |
| Peinture         | 0,01  | Fo3  | Sc2  | 50,00       | 10                                     |  |  |                               |                                |                               |        |  |                                |  |                                      |
| Pied             | 1,00  | 0,25   | 1,00   | Fvs         | 1800                                   | 1  | 0,50   | 5000                          | 0,10                           | 2,00                          | Ass    | 0,10   | 0,01                           | 3000   | 5                                    |
| Plateau          | 1,00  | 1,00   | 1,00   | Fpt         |  |  |  |                               |                                |                               | Ptr    | 2,00   |                                |  | 0,10                                 |
| Planchette       | 1,00  | 0,05   | 1,00   | Sc1         | 500                                    | 1  | 1,00   | 0,10                          | 2,00                           | Ass                           | 7,00   | 0,10   | 2                              |  |                                      |
| Table non peinte | 2,60  | 2,00   | 1,00   | Sc2         | 20                                     | 1  | 2,00   |                               |                                | 0,10                          | 2,00   | Ass  |                                | 80,00  | 0,11                                 |
| Meuble simple    | 2,60  | 2,00   | 1,00   | Sc3         | 52                                     | 1  | 3,00   | 1,00                          | 20,00                          | Ass                           | 5,00   | 0,10   | 2                              |  |                                      |
| Meuble grand     | 4,33  | 3,00   | 1,00   | Ass         |  |  |  |                               |                                |                               | 1      | 5,00   |                                | 1,50   | 30,00                                |
| Table peinte     | 1,00  | 2,00   | 1,00   | Ptr         | 100                                    | 3  | 3,00   | 2,00                          | 40,00                          | Cl2, Cl3                      | 300,00 | Non connu  | Non applicable                 |  |                                      |
|                  |   |  |  |             |  |  |  | 1,10                          | 22,00                          |                               | Cl1    |  |                                | 200,00   |                                      |

Tableau 4.1 : Principales données caractérisant le cas-type

### 4.3.3 Les problématiques considérées

Les hypothèses de travail définies précédemment limitent la complexité du problème sans pour autant restreindre le champ d'étude. Ainsi, différents phénomènes (relevant de problématiques industrielles) peuvent être étudiés sur la base de ce cas-type :

- Approvisionnement à choix multiples (« multi-sourcing ») : une entreprise peut choisir entre plusieurs fournisseurs pour s'approvisionner en un même composant, ce qui lui permet de répartir les approvisionnements induits par ses propres besoins sur les différents fournisseurs, en fonction de certains critères (prix, qualité, délai de livraison,...). Cette configuration est présente dans notre cas d'étude : la scierie 3 s'approvisionne auprès de deux fournisseurs. Néanmoins, nous considérons ici que le portefeuille-fournisseurs de chaque entreprise est figé, définissant une structure de chaîne logistique non évolutive (à l'échelle de l'horizon de planification).
- Gestion des priorités de livraison : une entreprise faisant face à une variation importante de commandes ou à des aléas de production peut être dans l'incapacité de produire les quantités demandées et donc obligée de mettre en place des priorités dans les livraisons à ses clients. Cette situation est présente dans notre cas d'étude, les clients (C12) et (C13) s'approvisionnant auprès d'une même entreprise (Ass).
- Couplage de chaînes logistiques : il nous a paru important de traiter le cas de chaînes logistiques couplées par l'existence d'une entreprise commune, ici l'Assembleur, partageant son activité entre les différentes chaînes. Cette situation implique la recherche de résolution de conflits d'intérêts entre optimisation locale (au sein de l'entreprise) et globale (sur l'ensemble des chaînes auxquelles participe l'entreprise) de l'activité de production.
- Chaînes logistiques multi-rangs : pour pouvoir analyser les phénomènes de propagation des contraintes au sein d'une chaîne, le cas-type permet de poser des études impliquant jusqu'à cinq acteurs (par exemple : Fo1 – Scierie 1 – Assembleur – Peintre – C11).

## 4.4 Objectifs et protocoles d'expérimentation

Sur la base du cas-type, une série d'expérimentations est réalisée dans l'optique de recenser les performances propres à chaque famille d'architectures de pilotage. Ces expérimentations sont effectuées :

- dans un contexte délimité par un ensemble d'hypothèses et de conditions initiales,
- par une simulation couplant un solveur d'équations linéaires à un tableur (pour la structuration des données manipulées par le modèle).

Nous allons dans ce paragraphe caractériser les diverses expérimentations qui ont été conduites.

#### 4.4.1 Définition des architectures de pilotage appliquées au cas-type

L'objet de l'analyse de performances basée sur le cas-type est la comparaison des trois grandes familles de pilotage. Les trois architectures de pilotage présentées chapitre 2 sont, sous certaines hypothèses, appliquées à la conduite de la structure physique présentée précédemment :

*Pilotage distribué* : chaque acteur de la chaîne gère localement sa production, son approvisionnement et sa distribution, suivant sa propre politique de gestion, et ce en l'absence d'optimisation globale. Chaque entreprise dispose de son propre ensemble de ressources de transformation et de stockage pilotées par un centre de décision (figure 4.4). Dans une telle architecture, les commandes en produits sont propagées au travers de relations client-fournisseur successives, à l'opposé du sens des flux matières.

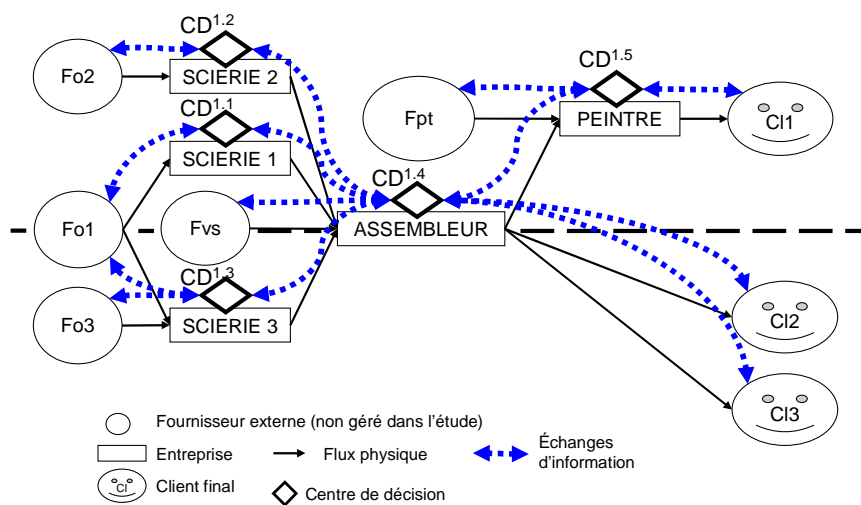


Figure 4.4 : Pilotage distribué appliqué au cas-type

*Pilotage centralisé* : la particularité de cette architecture est de disposer d'un centre de décision centralisant les informations de suivi de production et pilotant de manière coordonnée l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique (figure 4.5). Les flux physiques sont ainsi planifiés de manière optimale (optimisation globale). Les décisions propres à chaque entreprise sont réduites à leur plus simple expression (peu ou pas d'autonomie locale de gestion).

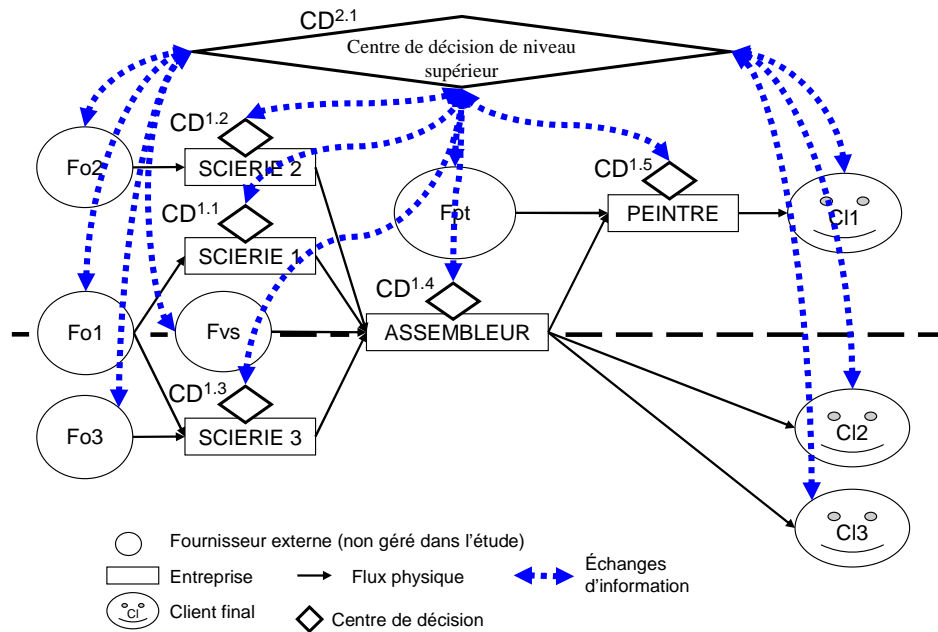


Figure 4.5 : Pilotage centralisé appliqué au cas-type

*Pilotage mixte* : le réseau d'entreprises est structuré selon une logique « produits » et divisé en deux chaînes logistiques. Chacune des deux chaînes est pilotée par un centre de décision ayant une vision globale de l'activité des acteurs ajoutant de la valeur à la même famille de produits (figure 4.6). Nous qualifions également cette architecture de *pilotage par chaîne*.

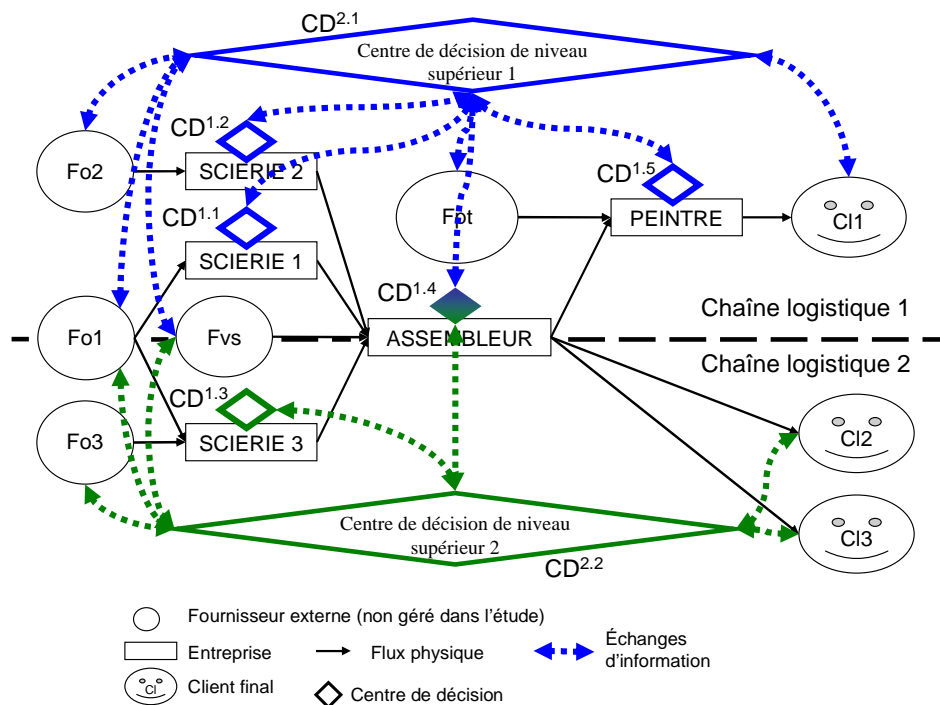


Figure 4.6 : Pilotage mixte appliqué au cas-type

Il est important de remarquer les points suivants :

- Avec le pilotage mixte, l'assembleur est soumis aux demandes en produits émanant des deux chaînes logistiques et doit donc arbitrer ces demandes en répartissant sa capacité de production de manière efficace, c'est-à-dire en tentant de satisfaire l'ensemble des besoins émis par les centres de décision pilotant les chaînes, mais également en garantissant son propre profit. Ce point fera l'objet d'une étude particulière (chapitre 5). Nous faisons ici l'hypothèse que l'assembleur partage équitablement sa capacité entre les deux chaînes (50-50).
- Quelle que soit l'architecture de pilotage considérée, chaque centre de décision dispose, avec le même niveau de détail, d'informations sur le système physique à piloter. L'agrégation des données, utile dans les structures de pilotage hiérarchisées, n'est pas abordée dans cette expérimentation, mais n'en demeure pas moins possible, compte tenu de la généricité du modèle analytique proposé, et fera l'objet de perspectives de développement de ce travail.
- L'analyse des architectures se veut plus particulièrement illustrer l'importance du partage d'information (« information sharing »), en faisant un comparatif des approches où l'information et la prise de décision sont nullement, partiellement ou totalement accessibles à l'ensemble des partenaires.

#### 4.4.2 Données initiales

Les expérimentations s'appuient sur un ensemble de données initiales, que nous avons évaluées comme suit :

- Paramètres temporels : L'horizon de planification de chaque entreprise est de 8 semaines de 5 jours, soient 40 jours travaillés. Cet horizon est décomposé en périodes élémentaires correspondant à une journée (7 heures de travail).
- Stocks et en-cours : Tous les stocks (de composants, sous-ensembles et produits finis) sont initialement à zéro et aucune rupture n'est à déplorer (à  $t = 0$ , aucun retard de production issu des périodes antérieures). Les conditions initiales sur le flux physique (en-cours de transport et de production) sont par ailleurs définies de façon à assurer la sortie de 10 tables peintes, 20 meubles simples et 10 meubles grands pour les premières périodes composant l'horizon de planification.

#### 4.4.3 Présentation de l'outil de simulation

L'outil de simulation utilisé pour expérimenter les différentes architectures de pilotage est basé sur l'utilisation conjointe du solveur de programmation linéaire (algorithme du Simplexe) Xpress-MP et du tableur Excel, qui nous sert de base de données et d'interface. La structuration de la base de données détermine les informations accessibles par chacun des décideurs. En effet, à chaque centre de décision sont associés (cf. figure 4.7) :

- un fichier Excel d'entrée, qui récapitule toutes les données dont il dispose : les demandes en produits, les données technico-financières de l'entreprise, et les données initiales telles que les niveaux de stock, les en-cours de production, etc...
- un fichier utilisable par Xpress-MP comprenant la formulation du problème d'optimisation par instanciation du modèle générique de planification,
- et un fichier Excel de sortie pour placer les résultats (dont un historique).

Au sein d'un centre de décision, préalablement à la planification de la production, la simulation commence par la mise à jour, dans le fichier d'entrée, des données disponibles (relatives aux nouvelles demandes et au suivi de production). On lance ensuite sous Xpress-MP le calcul permettant d'optimiser la planification à partir des données issues du fichier d'entrée. Les résultats, relatifs entre autres au plan de production calculé, sont alors écrits dans le fichier de sortie. La simulation laisse alors la main au décideur qui valide ou non ces résultats. Dans le cas d'un refus de ces derniers, le décideur peut modifier certains paramètres dans le fichier des données et relancer un calcul de planification. Cette boucle propose une aide à la décision, puisque le logiciel Xpress offre au décideur une planification optimisée par rapport au critère défini par le décideur lui-même, tout en prenant en compte le nouveau paramétrage. Lorsque le décideur est satisfait des résultats de planification obtenus, il les valide et ces derniers constituent les ordres de production (OF) et les ordres d'achat (OA) destinés, respectivement, à l'entité pilotée et aux fournisseurs de celle-ci.

Après que la période de replanification se soit écoulée, on recommence cette procédure, et ce jusqu'à ce que tout l'horizon soit parcouru.

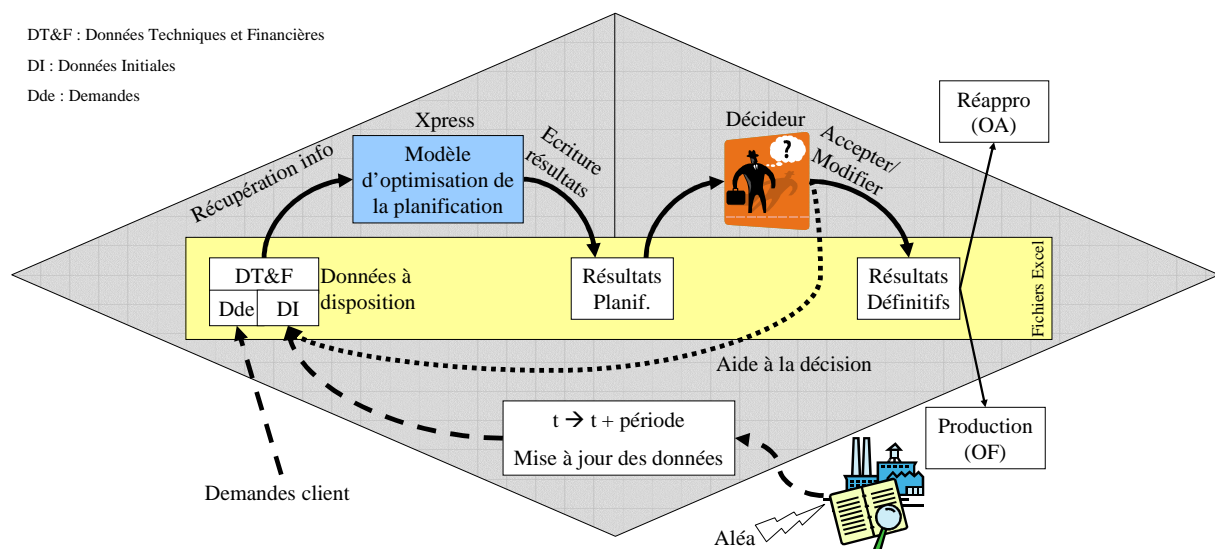


Figure 4.7 : Principe de la simulation de planification au sein d'un centre de décision

Ce principe est applicable à tout centre de décision quelle que soit l'architecture de pilotage. Les transferts d'information entre les centres de décision (via les fichiers Excel) se font à l'aide de « macros » Visual Basic.

Remarque :

Nous avons donc développé un outil panachant un solveur et une base de données permettant d'évaluer les performances des chaînes logistiques. Nous l'utilisons certes, dans le cadre de cette thèse, en simulation de chaînes logistiques simples, à des fins d'analyse comparative d'architectures de pilotage. Rappelons toutefois que son utilisation est envisageable :

- en conception de chaînes logistiques réelles pour la validation d'architectures physiques et de pilotage,
- en exploitation pour l'aide à la planification en fonction de critères d'optimisation définis *ad libitum*.

Cet usage est d'autant plus réaliste que l'optimisation est réalisée à l'aide d'un solveur rapide (de l'ordre de quelques minutes) et peut être sans difficulté étendue à des problèmes de taille assez importante. L'approche est donc applicable à des études de cas réels.

## 4.5 Etude de la robustesse

La première analyse réalisée vise à étudier la robustesse du modèle de planification face à l'incertitude des données. Les expérimentations menées dans ce cadre s'appuient sur des jeux de données (ou scénarios) et s'effectuent à horizon statique (pas de planification à horizon glissant).

### 4.5.1 Scénarios d'expérimentation

L'analyse s'appuie sur un jeu de données de référence caractérisant une gestion considérée comme nominale. Ce scénario de référence s'appuie sur les données techniques et conditions initiales définies préalablement (cf. §4.3.2 et §4.4.2), et répond à une demande en produits constante : 10 tables peintes, 20 meubles simples et 10 meubles grands par période sur tout l'horizon.

A partir du jeu de données de référence, différentes familles de scénarios sont développées afin d'évaluer leur robustesse par la sensibilité des performances de planification à la variation d'un paramètre donné, toutes les autres données étant par ailleurs considérées comme constantes. Les résultats extraits de la simulation de planification pour chaque jeu de données déterminent les mesures de performances définies en §4.2.1. La sensibilité des performances à la variation de tel ou tel paramètre est exprimée de manière relative, par comparaison des résultats obtenus pour ces jeux avec les résultats du scénario de référence.

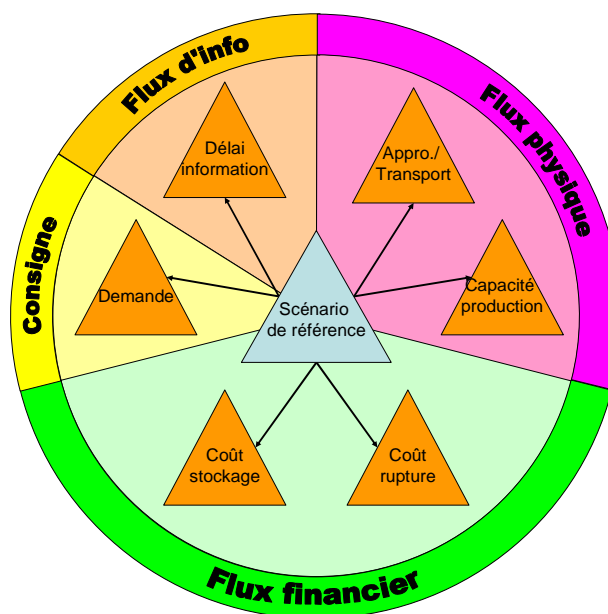


Figure 4.8 : Etude de robustesse : variation de paramètres autour d'un scénario de référence

Les familles de scénarios évalués sont regroupées sur la figure 4.8 selon les différents types de flux (physique, financier, d'information) dans la chaîne logistique et suivant la «consigne du système», c'est-à-dire les demandes des clients. Ces familles de scénarios d'expérimentation visent à évaluer l'impact :



- de l'incertitude sur des données de gestion de production, susceptibles de grever l'adéquation charge-capacité. Ainsi, nous étudions les impacts :
  - d'une variation de la demande, qui peut être significative d'une mauvaise prévision des ventes (sous- ou surestimation des quantités commandées par un client),
  - d'une variation de la capacité de production, qui traduit un manque de fiabilité des ressources, ou encore l'absentéisme du personnel (maladie, ...),
  - d'une variation de l'approvisionnement, qui traduit le non respect des délais et/ou des quantités négociés avec les fournisseurs.
- de l'incertitude sur les données financières, traduisant une mauvaise maîtrise du coût de revient du produit tout au long de la chaîne logistique. L'étude de sensibilité se centre alors sur :
  - le coût de rupture (mauvaise estimation des coûts),
  - le coût de stockage (idem).
- d'une mauvaise maîtrise des délais administratifs se traduisant par un délai d'information fluctuant. Ce dernier point est particulièrement intéressant à étudier dans le cadre du pilotage distribué, car le délai d'information influe sur la chronologie des événements.

Lorsque le délai d'information est nul (cf. figure 4.9), les prises de décision sont quasi-synchrones : le peintre planifie sa production, puis envoie ses commandes à l'assembleur ; ce dernier fait aussitôt son propre calcul, et ainsi de suite.

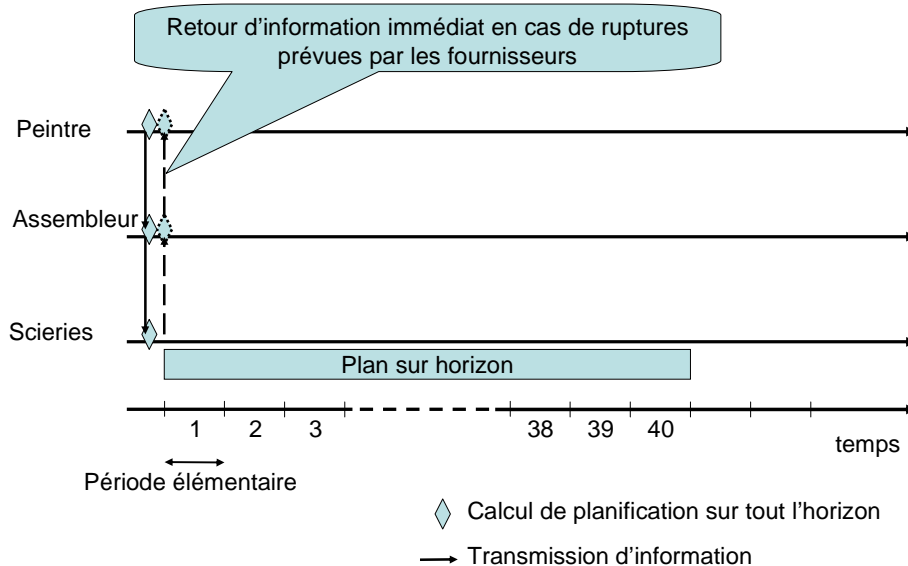


Figure 4.9 : Chronologie des événements dans le cas où le délai d'information est nul

Au cas où des ruptures apparaîtraient dans le plan des scieries ou de l'assembleur, alors les plans de livraison / réception pourraient ne pas être cohérents tout au long de la chaîne, auquel cas les plans prévisionnels ne seraient pas faisables. Pour éviter de simuler toutes les périodes de l'horizon et de vérifier la cohérence des plans, nous appliquons la règle suivante : si un fournisseur prévoit des ruptures, il envoie à ses clients son plan de livraison. Le client intègre alors ce plan en tant que contrainte dans son modèle de planification et refait sa planification.

En cas de délai d'information non nul (cf. figure 4.10), les décisions des différents acteurs sont prises à des instants différents. Nous utilisons la même règle pour trouver un plan cohérent et faisable sur l'ensemble du réseau d'entreprises, sans avoir à simuler l'ensemble de l'horizon pas-à-pas.

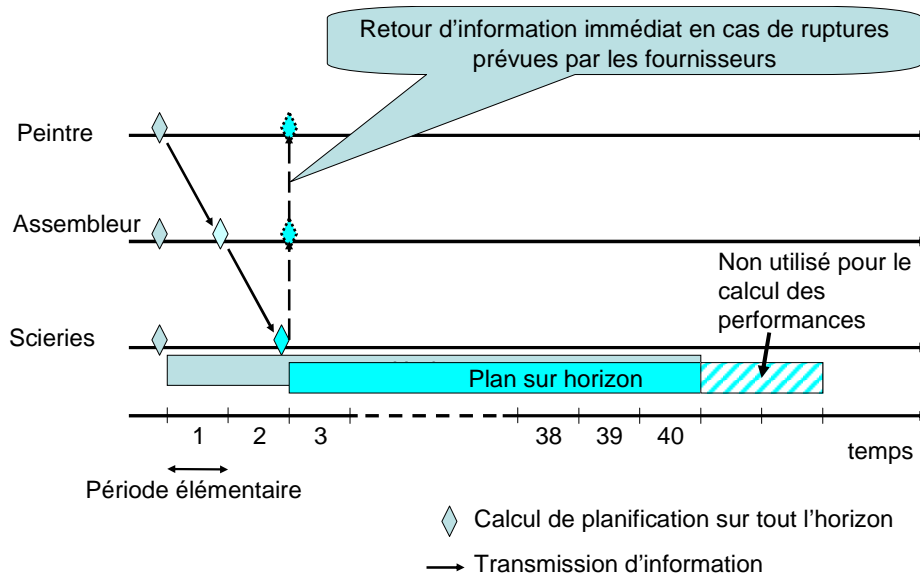


Figure 4.10 : Chronologie des événements dans le cas où le délai d'information équivaut à une période

#### 4.5.2 Résultats des campagnes expérimentales

Les résultats de planification dans le cadre du scénario de référence donnent les performances suivantes :

- Profit = 374 360 unités monétaires
- Nombre de stock sur les 40 périodes = 0 produit stocké
- Nombre de rupture de stock sur les 40 périodes = 0 rupture constatée

Pour chaque famille de scénarios, plusieurs cas sont simulés correspondant à différentes variations du paramètre considéré suivant son amplitude ou son occurrence dans le temps. Plus de 170 simulations ont ainsi été effectuées.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.2. Pour chaque famille de scénarios, le nombre de cas simulés est précisé, ainsi que la performance de chaque pilotage. Cette dernière est projetée selon les neuf axes « gain des ventes », « coût achat », « coût production », « coût rupture », « coût stockage », « profit », « nombre de ruptures », « nombre de stock », et « coût stockage des produits entrants ». La robustesse des modèles de planification est alors évaluée par mesure de la différence de performance entre les valeurs moyennes des résultats obtenus sur les différents cas simulés, et celles que donne l'application du calcul au scénario de référence. Dans les graphiques suivants, nous nous focaliserons sur les performances relatives à l'ensemble des coûts et au profit.

Le tableau donne aussi, pour le pilotage par chaîne et pour le pilotage distribué, l'écart entre la performance mesurée et celle obtenue par le pilotage centralisé, cette dernière étant optimale vis-à-vis des jeux de données considérés.



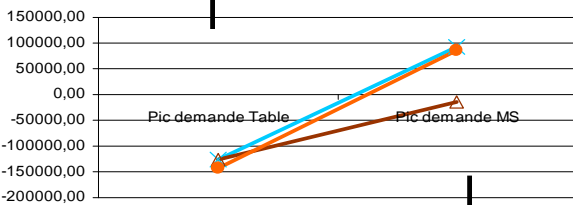
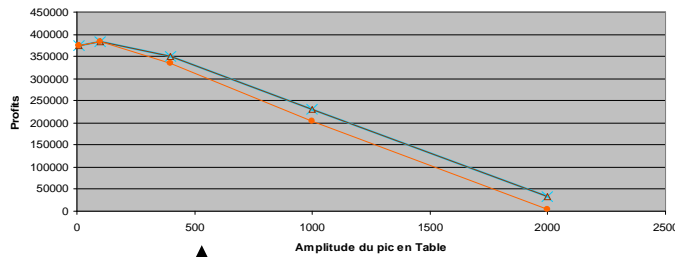
|                    | Paramètres   |                     | Pilotes            |   |            | Valeur moyenne |            |            | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | # avec centralisé |           |          |
|--------------------|--|---------------------|--------------------|---|------------|----------------|------------|------------|--|------------|-----------|-------------------|-----------|----------|
|                    | Descriptif scénario (type de variation sur les cas simulés)            | Nbre de cas simulés | Performance        | Centralisé  | Par chaîne | Distribué      | Centralisé | Par chaîne | Distribué                              | Par chaîne | Distribué |                   |           |          |
| Flux financier     | Coût de rupture = 10 x coût stockage et Pic demande en Table           | 4                   | Vente              | 804900,00   | 804900,00  | 827950,00      | 82440,00   | 82440,00   | 105490,00                              | 0,00       | 23050,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Achat         | 381680,00   | 381680,00  | 417980,00      | 63720,00   | 63720,00   | 100200,00                              | 0,00       | 36300,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Prod          | 27510,00  | 27510,00   | 29125,00       | 2160,00    | 2160,00    | 3775,00                                | 0,00       | 1615,00   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Rupture       | 70785,00  | 70785,00   | 70785,00       | 70785,00   | 70785,00   | 70785,00                               | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Stock         | 251,25  | 293,02     | 2986,74        | 251,25     | 293,02     | 2986,74                                | 41,77      | 2735,49   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Profit             | 319811,75   | 319769,98  | 302193,26      | -54548,25  | -54590,02  | -72166,74                              | -41,77     | -17618,49 |                   |           |          |
|                    |  |                     | Rupture            | 6435,00   | 6435,00    | 6435,00        | 6435,00    | 6435,00    | 6435,00                                | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
|                    |  |                     | Stock              | 675,00  | 675,00     | 24476,67       | 675,00     | 675,00     | 24476,67                               | 0,00       | 23801,67  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Coût Stock Er      | 4,17  | 49,81      | 2777,49        | 4,17       | 49,81      | 2777,49                                | 45,64      | 2773,32   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Vente              | 804900,00   | 804900,00  | 827950,00      | 82440,00   | 82440,00   | 105490,00                              | 0,00       | 23050,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Achat         | 381680,00   | 381680,00  | 417980,00      | 63720,00   | 63720,00   | 100200,00                              | 0,00       | 36300,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Prod          | 27510,00  | 27510,00   | 29125,00       | 2160,00    | 2160,00    | 3775,00                                | 0,00       | 1615,00   |                   |           |          |
| Cout Rupture       | 28314,00   | 28324,15            | 28359,03           | 28314,00  | 28324,15   | 28359,03       | 10,15      | 45,03      |  |            |           |                   |           |          |
| Cout Stock         | 251,25   | 282,63              | 2933,74            | 251,25  | 282,63     | 2933,74        | 31,38      | 2682,49    |  |            |           |                   |           |          |
| Profit             | 362282,75  | 362241,21           | 344669,93          | -12077,25   | -12118,79  | -29690,07      | -41,54     | -17612,82  |  |            |           |                   |           |          |
| Rupture            | 6435,00  | 6437,31             | 6441,75            | 6435,00   | 6437,31    | 6441,75        | 2,31       | 6,75       |  |            |           |                   |           |          |
| Stock              | 675,00   | 677,31              | 24167,37           | 675,00  | 677,31     | 24167,37       | 2,31       | 23492,37   |  |            |           |                   |           |          |
| Coût Stock Er      | 4,17   | 41,35               | 2727,69            | 4,17  | 41,35      | 2727,69        | 37,18      | 2723,52    |  |            |           |                   |           |          |
| Flux financier     | Coût de rupture = 4 x coût stockage et Pic demande en Table            | 4                   | Vente              | 804900,00   | 804900,00  | 827950,00      | 82440,00   | 82440,00   | 105490,00                              | 0,00       | 23050,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Achat         | 381680,00   | 381680,00  | 418196,00      | 63720,00   | 63720,00   | 100236,00                              | 0,00       | 36516,00  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Prod          | 27510,00  | 27510,00   | 29125,00       | 2160,00    | 2160,00    | 3775,00                                | 0,00       | 1615,00   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Rupture       | 141570,00   | 141570,00  | 141910,32      | 141570,00  | 141570,00  | 141910,32                              | 0,00       | 340,32    |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Stock         | 229,53  | 249,95     | 1743,77        | 229,53     | 249,95     | 1743,77                                | 20,42      | 1514,24   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Profit             | 249048,47   | 249028,05  | 232090,31      | -125311,53 | -125331,95 | -142269,69                             | -20,42     | -16958,16 |                   |           |          |
|                    |  |                     | Rupture            | 6435,00   | 6435,00    | 6443,51        | 6435,00    | 6435,00    | 6443,51                                | 0,00       | 8,51      |                   |           |          |
|                    |  |                     | Stock              | 675,00  | 675,00     | 26348,90       | 675,00     | 675,00     | 26348,90                               | 0,00       | 25673,90  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Coût Stock Er      | 31,53   | 51,95      | 1515,36        | 31,53      | 51,95      | 1515,36                                | 20,42      | 1483,82   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Flux financier     | Coût stockage (préférence chez client) et Pic demande en Table          | 4          | Vente          | 804900,00  | 804900,00  | 827950,00                              | 82440,00   | 82440,00  | 105490,00         | 0,00      | 23050,00 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Achat     | 381680,00  | 381680,00  | 418103,00                              | 63720,00   | 63720,00  | 100143,00         | 0,00      | 36423,00 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Prod      | 27510,00   | 27510,00   | 29170,00                               | 2160,00    | 2160,00   | 3820,00           | 0,00      | 1660,00  |
| Cout Rupture       | 141570,00  | 141570,00           |                    |   |            | 141570,00      | 141570,00  | 141570,00  | 141570,00                              | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
| Cout Stock         | 224,62   | 245,51              |                    |   |            | 4209,02        | 224,62     | 245,51     | 4209,02                                | 20,88      | 3984,40   |                   |           |          |
| Profit             | 249053,38  | 249032,49           |                    |   |            | 230017,98      | -125306,62 | -125327,51 | -144342,02                             | -20,88     | -19035,40 |                   |           |          |
| Rupture            | 6435,00  | 6435,00             |                    |   |            | 6435,00        | 6435,00    | 6435,00    | 6435,00                                | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
| Stock              | 675,00   | 675,00              |                    |   |            | 24432,67       | 675,00     | 675,00     | 24432,67                               | 0,00       | 23757,67  |                   |           |          |
| Coût Stock Er      | 0,00   | 0,00                |                    |   |            | 3669,40        | 0,00       | 0,00       | 3669,40                                | 0,00       | 3669,40   |                   |           |          |
| Consigne           | Pic demande table (variation amplitude)                                | 4                   |                    |   |            | Vente          | 804900,00  | 804900,00  | 827950,00                              | 82440,00   | 82440,00  | 105490,00         | 0,00      | 23050,00 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Achat     | 381680,00  | 381680,00  | 418088,00                              | 63720,00   | 63720,00  | 100128,00         | 0,00      | 36408,00 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Prod      | 27510,00   | 27510,00   | 29125,00                               | 2160,00    | 2160,00   | 3775,00           | 0,00      | 1615,00  |
|                    |  |                     | Cout Rupture       | 141570,00   | 141570,00  | 141570,00      | 141570,00  | 141570,00  | 141570,00                              | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Stock         | 251,25  | 293,02     | 3013,19        | 251,25     | 293,02     | 3013,19                                | 41,77      | 2761,94   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Profit             | 249026,75   | 248984,98  | 231273,81      | -125333,25 | -125375,02 | -143086,19                             | -41,77     | -17752,94 |                   |           |          |
|                    |  |                     | Rupture            | 6435,00   | 6435,00    | 6435,00        | 6435,00    | 6435,00    | 6435,00                                | 0,00       | 0,00      |                   |           |          |
|                    |  |                     | Stock              | 675,00  | 675,00     | 24477,67       | 675,00     | 675,00     | 24477,67                               | 0,00       | 23802,67  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Coût Stock Er      | 4,17  | 50,58      | 2797,94        | 4,17       | 50,58      | 2797,94                                | 46,41      | 2793,77   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Consigne           | Pic demande Meuble Simple (variation amplitude)                         | 9          | Vente          | 1097626,67 | 1005429,08 | 1092070,97                             | 375166,67  | 282969,08 | 369610,97         | -92197,58 | -5555,69 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Achat     | 470742,22  | 431587,99  | 468315,97                              | 152782,22  | 113627,99 | 150355,97         | -39154,23 | -2426,25 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Prod      | 40516,11   | 36764,63   | 40591,94                               | 15166,11   | 11414,63  | 15241,94          | -3751,48  | 75,83    |
| Cout Rupture       | 99140,74   | 163394,48           |                    |   |            | 102836,83      | 99140,74   | 163394,48  | 102836,83                              | 64253,74   | 3696,09   |                   |           |          |
| Cout Stock         | 10860,09   | 7425,84             |                    |   |            | 12884,98       | 10860,09   | 7425,84    | 12884,98                               | -3434,25   | 2024,89   |                   |           |          |
| Profit             | 468377,50  | 359072,50           |                    |   |            | 459455,26      | 94017,50   | -15287,50  | 85095,26                               | -109305,00 | -8922,24  |                   |           |          |
| Rupture            | 3221,85  | 5273,57             |                    |   |            | 3374,11        | 3221,85    | 5273,57    | 3374,11                                | 2051,71    | 152,26    |                   |           |          |
| Stock              | 6845,74  | 4621,85             |                    |   |            | 45862,15       | 6845,74    | 4621,85    | 45862,15                               | -2223,89   | 39016,41  |                   |           |          |
| Coût Stock Er      | 0,00   | 0,00                |                    |   |            | 1104,05        | 0,00       | 0,00       | 1104,05                                | 0,00       | 1104,05   |                   |           |          |
| Flux d'information | Délai d'info = 1 période et pic demande en table (variation amplitude) | 10                  |                    |   |            | Vente          | 805524,55  | 805524,55  | 821002,55                              | 83064,55   | 83064,55  | 98542,55          | 0,00      | 15478,00 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Achat     | 382162,73  | 382162,73  | 413689,72                              | 64202,73   | 64202,73  | 95729,72          | 0,00      | 31526,99 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Prod      | 27526,36   | 27526,36   | 29114,43                               | 2176,36    | 2176,36   | 3764,43           | 0,00      | 1588,07  |
|                    |  |                     | Cout Rupture       | 40980,00  | 40991,08   | 41649,49       | 40980,00   | 40991,08   | 41649,49                               | 11,08      | 669,49    |                   |           |          |
|                    |  |                     | Cout Stock         | 254,32  | 282,88     | 2482,88        | 254,32     | 282,88     | 2482,88                                | 28,56      | 2228,56   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Profit             | 349738,59   | 349698,95  | 329178,23      | -24621,41  | -24661,05  | -45181,77                              | -39,64     | -20560,36 |                   |           |          |
|                    |  |                     | Rupture            | 9313,64   | 9316,15    | 9462,78        | 9313,64    | 9316,15    | 9462,78                                | 2,52       | 149,14    |                   |           |          |
|                    |  |                     | Stock              | 675,00  | 677,52     | 20711,15       | 675,00     | 677,52     | 20711,15                               | 2,52       | 20036,15  |                   |           |          |
|                    |  |                     | Coût Stock Er      | 1,52  | 35,77      | 2224,95        | 1,52       | 35,77      | 2224,95                                | 34,25      | 2223,43   |                   |           |          |
|                    |  |                     | Flux d'information | Délai d'info = 2 périodes et pic demande en table (variation amplitude) | 11         | Vente          | 805524,55  | 805524,55  | 814084,19                              | 83064,55   | 83064,55  | 91624,19          | 0,00      | 8559,64  |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Achat     | 382162,73  | 382162,73  | 409652,47                              | 64202,73   | 64202,73  | 91692,47          | 0,00      | 27489,74 |
|                    |  |                     |                    |   |            | Cout Prod      | 27526,36   | 27526,36   | 29059,20                               | 2176,36    | 2176,36   | 3709,20           | 0,00      | 1532,84  |
| Cout Rupture       | 40980,00   | 40991,08            |                    |   |            | 42401,46       | 40980,00   | 40991,08   | 42401,46                               | 11,08      | 1421,46   |                   |           |          |
| Cout Stock         | 254,32   | 282,88              |                    |   |            | 2126,86        | 254,32     | 282,88     | 2126,86                                | 28,56      | 1872,54   |                   |           |          |
| Profit             | 349738,59  | 349698,95           |                    |   |            | 326062,02      | -24621,41  | -24661,05  | -48297,98                              | -39,64     | -23676,57 |                   |           |          |
| Rupture            | 9313,64  | 9316,15             |                    |   |            | 9607,14        | 9313,64    | 9316,15    | 9607,14                                | 2,52       | 293,50    |                   |           |          |
| Stock              | 675,00   | 677,52              |                    |   |            | 17470,58       | 675,00     | 677,52     | 17470,58                               | 2,52       | 16795,58  |                   |           |          |
| Coût Stock Er      | 1,52   | 35,77               |                    |   |            | 1806,82        | 1,52       | 35,77      | 1806,82                                | 34,25      | 1805,30   |                   |           |          |

Tableau 4.2 : Résultats pour l'étude de la robustesse

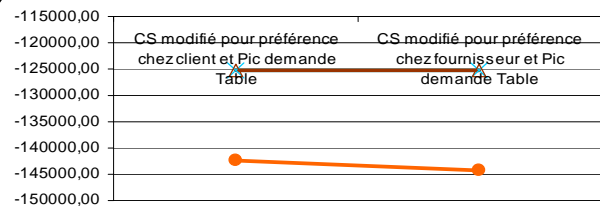
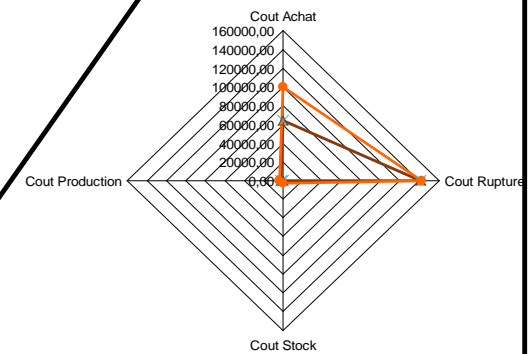
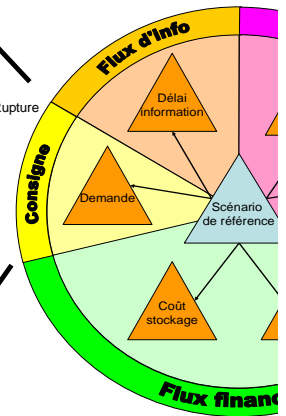
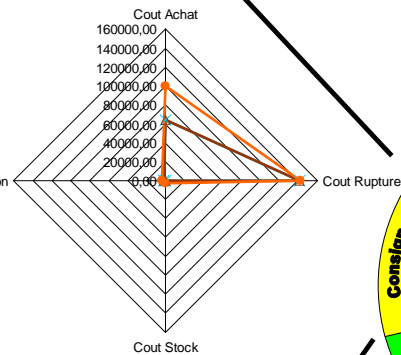
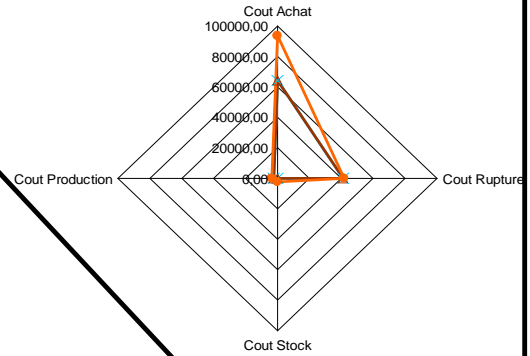
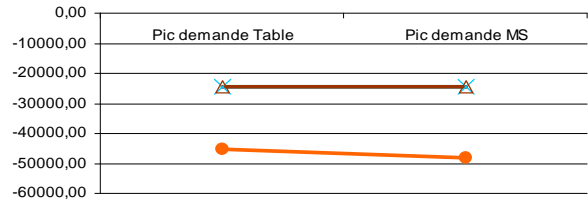
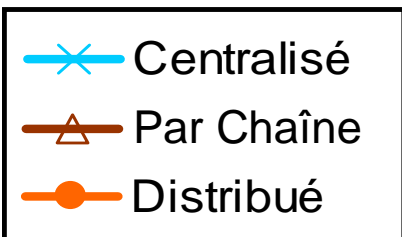
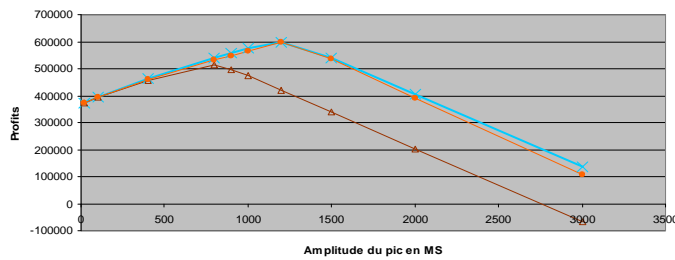
### 4.5.3 Analyse des résultats

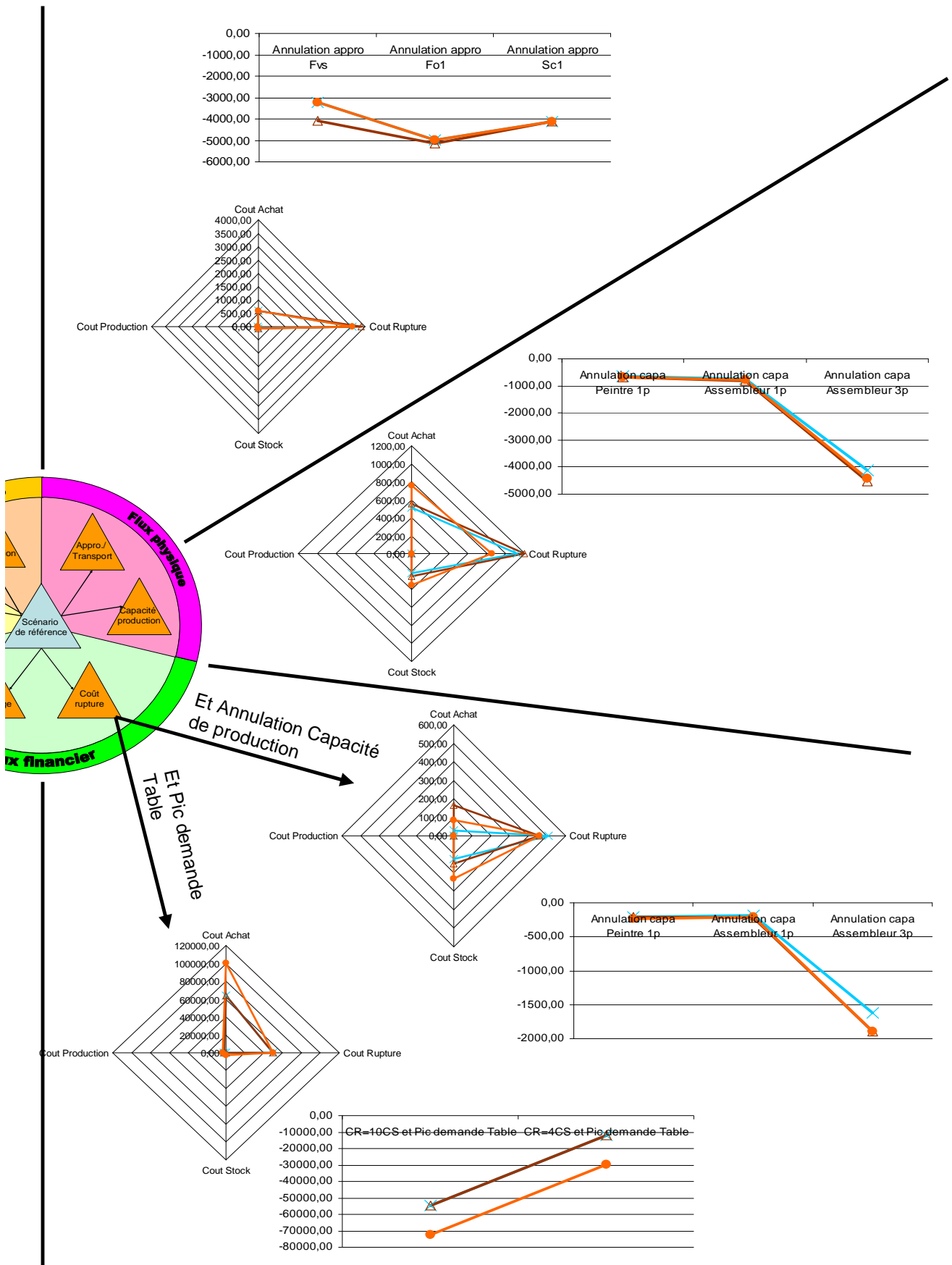
Les résultats bruts du tableau 4.2 sont analysés dans ce paragraphe, afin de qualifier la robustesse des différents types de pilotage. Nous les avons regroupés par deux ou trois, afin d'obtenir des performances moyennes issues de simulations portant sur la variation d'un même paramètre. Les performances moyennes des coûts, calculés pour chaque architecture de pilotage, sont comparées à l'aide des « radars » de la figure 4.11. Sur cette figure, nous avons ajouté les variations du profit de l'ensemble du réseau en fonction des différentes simulations effectuées.

Profits suivant l'amplitude du pic de demande en Table



Profits suivant l'amplitude du pic de demande en MS





Les résultats obtenus nous amènent aux analyses suivantes :

*Etude de la variation de la demande* : En faisant varier la consigne par le plan de demandes, nous étudions la robustesse vis-à-vis d'une mauvaise estimation des commandes d'un client. Les cas simulés correspondent à une augmentation progressive de la demande client exprimée au 32ème jour : la demande initiale de 20 produits prend successivement les valeurs 45, 100, 200, 400, ...

Appliquée à la chaîne logistique fabriquant des tables, l'augmentation de la demande provoque une saturation de la capacité des ressources, conduisant dans un premier temps à un lissage amont de la production. Des ruptures de stocks apparaissent par la suite, lorsque la fabrication, trop largement anticipée dans le temps, ne permet plus un approvisionnement dans des délais suffisamment rapides pour garantir la disponibilité des composants en nombre suffisant (le délai de réapprovisionnement est supérieur à l'intervalle de temps séparant l'instant de prise de décision et la période sur laquelle la production est lissée). Les performances sont ainsi fortement dégradées par rapport à celles mesurées dans le cadre du scénario de référence.

L'analyse est sensiblement différente lorsqu'on applique l'augmentation de la demande aux meubles simples. En effet, la demande initiale étant bien inférieure aux capacités de production, les capacités restant disponibles (capacités résiduelles) retardent le phénomène du lissage et assurent un meilleur profit (davantage de ventes de produits). Les solutions ainsi obtenues sont plutôt meilleures que la solution du scénario de référence, même si l'apparition de ruptures reste inévitable lorsque l'augmentation de la demande est très importante (en raison de la saturation de la capacité de production sur plusieurs périodes). Dans le cas du pilotage par chaîne, la capacité de l'assembleur n'est pas utilisée de la manière la plus pertinente ; en effet, la capacité résiduelle n'est calculée que par rapport à la capacité partielle que l'assembleur réserve à la fabrication des meubles (50% de sa capacité totale). La sous-évaluation de la capacité réellement disponible amène un lissage de la production beaucoup plus rapide, sans pouvoir égaler les performances du scénario de référence. Cette variation de la demande reste, pour ce type de pilotage, fortement perturbante.

*Etude de la variation de la capacité* : Les problèmes étudiés ici traitent de la diminution brutale des capacités de production (capacité nulle), que la situation s'applique au peintre ou à l'assembleur. Les premiers constats sont évidents : des stocks et des ruptures apparaissent, diminuant ainsi les profits réalisables (augmentation des coûts de stockage et de rupture). Néanmoins, ces phénomènes sont en moyenne d'autant plus flagrants que l'annulation de capacité concerne le peintre (de par sa position dans la chaîne logistique – dernier maillon) et non l'assembleur. Les phénomènes s'accroissent avec une durée d'annulation qui s'étend sur plusieurs périodes. En comparant les différents pilotages, on note que les approches centralisées et par chaîne présentent quasiment la même performance si la baisse de capacité intervient chez le peintre ; le pilotage distribué est dans ce cadre un peu moins performant. La tendance s'inverse lorsque l'annulation de la capacité intervient chez l'assembleur. Au vu des différents cas simulés, le pilotage par chaîne peut sembler faiblement performant. Cela s'explique par le handicap qu'occasionne l'assembleur dans la pré-réservation (non négociable) de la capacité qu'il décide d'allouer à chaque chaîne pour la réalisation des différentes activités.

*Etude de la variation de l'approvisionnement* : Par ces variations, nous simulons diverses incertitudes, typiquement une erreur lors de la transmission d'une commande ou un incident de transport avec perte des produits ou retard sur livraison. Les scénarios retenus consistent à procéder à l'annulation sur une période de la quantité transportée à destination de l'assembleur. Cette situation est appliquée successivement au fournisseur de vis, au Fo1, ou encore à la scierie 1. Dans tous les cas, des ruptures apparaissent du fait des délais pour réapprovisionner les quantités de produits ainsi perdues. Les gonflements de stocks correspondent aux composants dont la production est suspendue et qui doivent attendre les matières en rupture pour être assemblés. Dans ce contexte, les résultats sont équivalents pour les pilotages centralisé et distribué. Le pilotage par chaîne est un peu moins performant pour la raison évoquée précédemment.

Dans l'étude des paramètres « financiers », une variation de coûts de stockage ou de rupture n'apporte aucune dégradation de performance par rapport au scénario de référence; la planification permet en effet de trouver une solution sans stock ni rupture. La mesure de l'impact de ces variations doit alors se faire dans le cadre d'une situation de production dégradée où des ruptures en produits sont observées. Nous faisons le choix d'une étude de ces paramètres, non pas sur le scénario de référence, mais en simulant la planification pour les scénarios provoquant stocks et ruptures (notamment lorsque la capacité de production est annulée). Ces scénarios, avant modification des coûts, deviennent momentanément la référence dans l'étude de sensibilité du modèle aux variations de ces paramètres financiers.

*Etude de la variation des coûts de rupture* : Lorsque les coûts de rupture passent de 20 à 4 fois les coûts de stockage, alors que la capacité de production de l'assembleur ou du peintre est annulée, le nombre de ruptures augmente jusqu'à doubler par rapport au scénario initial. Ceci s'explique par le fait qu'il devient « rentable » d'accepter plus de ruptures et moins de stocks, plutôt que de faire systématiquement du stock pour éviter les ruptures. Dans le cas de scénarios où les coûts de rupture sont 4 fois plus importants que les coûts de stockage avec une variation sur la demande en meuble simple, les mêmes phénomènes sont constatés. Pour les scénarios où la variation des coûts de rupture (valeurs égales à 10 ou 4 fois les coûts de stockage), est corrélée avec une augmentation de la demande en tables, peu de changements sont observés par rapport au cas précédent (l'augmentation des ruptures est peu significative, et les niveaux de stock sont quasi-équivalents).

*Etude de la variation des coûts de stockage* : Lorsque les coûts de stockage évoluent, deux scénarios sont testés suivant le lieu préféré pour stocker les produits : soit chez le client, soit chez le fournisseur. Cette variation est combinée à une augmentation de la demande en tables. On constate alors que les solutions sont quasi-identiques pour les pilotages par chaîne et centralisé, si ce n'est que le positionnement des stocks répond à la stratégie de minimisation des coûts de stockage. Le pilotage distribué montre, quant à lui, des variations de performances plus importantes, notamment sur le nombre de stocks (+ 2000 produits dans la chaîne logistique des meubles s'il est préféré de stocker chez le client).



*Etude de la variation du délai d'information* : La dernière série d'expérimentations réalisée dans le cadre de l'étude de la robustesse du modèle de planification s'intéresse à la variation du délai d'information. Lorsque celui-ci varie (d'une à deux périodes), alors que la demande en tables ou meubles simples augmente, les résultats des pilotages par chaîne et centralisé sont inchangés par rapport au scénario de référence. Ce paramètre n'affecte que le pilotage distribué, qui voit toutes ses performances dégradées de manière significative.

#### 4.5.4 Conclusion sur l'étude de la robustesse

Pour conclure, nous synthétisons les résultats dans un tableau afin de juger de l'impact des variations des différents paramètres étudiés sur la performance des chaînes logistiques, en comparant les différents pilotages considérés. Afin d'en faciliter la lecture, le degré de robustesse sera noté de façon qualitative en fonction de l'écart moyen entre performances issues de l'application du scénario de référence et celles correspondant aux scénarios simulant la variation des paramètres; la solution est ainsi pas du tout (1) / peu (2) / moyennement (3) / assez (4) / ou très (5) robuste par rapport à la variation des paramètres considérés.

|                     | Centralisé | Par Chaîne | Distribué | Total |
|---------------------|------------|------------|-----------|-------|
| Appro               | 2          | 1          | 2         | 5     |
| Capacité production | 2          | 2          | 2         | 6     |
| Coût rupture        | 3          | 4          | 4         | 11    |
| Coût stockage       | 3          | 3          | 1         | 7     |
| Demande             | 2          | 2          | 1         | 5     |
| Délai information   | 5          | 5          | 2         | 12    |
| Total               | 17         | 17         | 12        |       |

1 : Pas du tout / 2 : Peu / 3 : Moyennement / 4 : Assez / 5 : Très ... robuste

Tableau 4.3 : Synthèse des résultats pour l'étude de la robustesse

Au bilan, le pilotage distribué apparaît globalement le moins robuste face à des incertitudes sur les données. Par exemple, concernant les niveaux de stock, il obtient systématiquement les pires résultats, quel que soit le paramètre modifié.

Concernant la sensibilité aux paramètres, les variations sur le délai d'information n'affectent que les résultats du pilotage distribué, car le délai d'information n'intervient pas sur les pilotages par chaîne et centralisé (d'où une note de 5 avec ces pilotages).

Par contre, une variation de la demande ou de l'approvisionnement modifie profondément la solution par rapport à la solution du scénario de référence. Ces informations sont en effet fondamentales dans le calcul de planification, et il paraît bien difficile, quel que soit le type de pilotage, d'en pallier les effets.

Ces résultats ne sont que des moyennes par rapport à la variation d'un paramètre, mais leur évolution n'est souvent pas linéaire, comme le montre la figure 4.11 qui illustre les profits détaillés en fonction de l'amplitude du pic sur la demande en meubles simples et en tables (consigne). On ne peut donc pas tirer de ces premiers résultats des tendances de fond : on voit par exemple que la hausse de la demande a d'abord un effet bénéfique avant de détériorer presque linéairement le profit lorsque le pic prend des valeurs importantes. La généralisation de ces résultats, qui sont le fait d'un jeu limité de scénarios, n'est donc pas chose aisée et doit inciter à la plus grande prudence.

Néanmoins, pour une chaîne et une architecture de pilotage données, le simulateur présente l'intérêt de permettre une analyse rapide de la robustesse du système à des domaines d'incertitude sur chacun des paramètres, et de définir les variations admissibles de ces paramètres, voire de quantifier les pénalités contractuelles lors des phases de négociation.

## **4.6 Etude de la réactivité**

Une deuxième campagne d'expérimentation s'est intéressée à l'analyse de la réactivité des différents types de pilotage face aux aléas de production. A l'instar de l'étude de la robustesse, différents scénarios d'expérimentations ont été élaborés, en calculant cette fois les plans de production de manière dynamique selon la technique de l'horizon glissant.

### **4.6.1 Scénarios d'expérimentation**

La réactivité qualifie la capacité qu'a un pilotage à s'adapter à tout événement inattendu exogène ou endogène à l'entité pilotée, en proposant une solution adaptée aux besoins du client. Pour tester la réactivité des trois architectures de pilotages, nous avons simulé une série d'aléas de production et observé la réaction du pilotage face à ces perturbations.

La comparaison des architectures est ici relative à l'étude de plusieurs facteurs :

- Le type d'aléa (panne de machine, retard d'approvisionnement, ...), ainsi que la gravité de l'aléa (que nous considérons proportionnelle à la durée de ce dernier), sont d'évidence les premiers paramètres à considérer.
- La valeur de la période de (re)planification est étudiée dans la mesure où elle conditionne le délai de réaction d'une architecture décisionnelle (les événements dont l'occurrence se situe dans la même période ne sont traités qu'à la fin de cette dernière).
- Le degré d'autonomie des centres de décisions locaux, et son impact sur les performances.
- Enfin, en pilotage distribué, le degré de collaboration entre les acteurs de la chaîne, nécessaire à la coordination des activités tout au long de la chaîne logistique.

Le premier facteur permet d'explorer une variété d'aléas et perturbations, afin de pouvoir en retirer des conclusions à caractère générique. Le second facteur relève du temps séparant l'observation des aléas de la réponse appropriée au problème identifié. Les derniers facteurs sont déterminants pour l'adaptation de la réponse (prise de décision consécutive aux traitements d'aléas) aux besoins du client et sont plus particulièrement détaillés.

*Autonomie locale* : l'autonomie locale caractérise la faculté d'un centre de décision à pallier un aléa (se traduisant par une dérive entre activité planifiée et activité réelle) par une prise de décision :

- sans remise en cause des objectifs imposés par un centre de décision hiérarchiquement supérieur. La décision locale se fait en respectant les mêmes contraintes que la prescription initiale.
- visant à modifier le plan localement, sur l'intervalle de temps séparant l'instant où la décision s'impose de la fin de période (de replanification) en cours. Toute modification au-delà de cette période s'avère un travail inutile, du fait du principe même de remise en cause des décisions en fin de chaque période de planification.
- et concernant uniquement les activités propres aux ressources qu'il pilote.

De telles décisions sont susceptibles de modifier les en-cours de production et livraison. Toutes les modifications constatées sont alors remontées au niveau décisionnel supérieur afin que celui-ci puisse les prendre en compte dans le prochain calcul de planification.

L'absence d'autonomie locale se solde par une application rigoureuse du plan issu des décisions supérieures, et la stricte remontée d'informations permettant le constat des dysfonctionnements sans chercher pour autant à en minimiser les effets.

*Collaboration entre acteurs* : nous considérons différents degrés de collaboration entre acteurs selon le niveau d'anticipation des ruptures que ces collaborations autorisent. Ces collaborations peuvent être classées selon deux axes, l'un relatif à la détection et au traitement d'événements non prévisibles (panne machine, absentéisme, ...), l'autre concernant la prise en compte de perturbations dont l'occurrence plus ou moins lointaine laisse le temps d'une réaction appropriée :

- 1) Des informations de « suivi » peuvent être, si besoin, communiquées du fournisseur vers le client, notamment concernant les quantités livrées. Ces informations de suivi sont transmises en fin de chaque période élémentaire lorsque les aléas ou perturbations constatés durant celle-ci amènent le fournisseur à ne pas respecter ses engagements vis-à-vis du client, en termes de quantités et délais de livraison, pour la ou les période(s) élémentaire(s) à venir. Deux situations sont alors considérées dans nos simulations :
  - a. Les commandes sont transmises du client au fournisseur, mais sans retour d'information quant aux ruptures du fournisseur. Dans ce cas, le client ne prend connaissance des problèmes de livraison qu'à réception des matières.
  - b. Des informations de suivi sont échangées entre partenaires dans les conditions évoquées plus haut. Elles permettent au client de pouvoir anticiper les problèmes de ruptures en réorganisant sur le court terme son planning de production et ses approvisionnements. L'information étant transmise par le fournisseur au départ des livraisons à destination du client, le niveau d'anticipation des ruptures est directement fonction du délai de transport.

- 2) L'un des facteurs d'anticipation des ruptures peut être la transmission du plan de livraison du fournisseur au client. Ce plan est alors connu des deux partenaires sur l'ensemble de l'horizon de planification, permettant notamment au client de vérifier l'adéquation des livraisons vis-à-vis des commandes passées, et ainsi de prendre les décisions qui s'imposent lors d'écart constatés. Deux cas sont alors étudiés :
- c. Le plan de livraison élaboré par le fournisseur n'est jamais transmis au client. Ce dernier n'a aucune vision prévisionnelle des en-cours de livraisons.
  - d. Le plan est transmis au client, qui peut ainsi coordonner parfaitement ses activités de production avec les livraisons de son fournisseur, réajuster ses approvisionnements pour les autres matières et ainsi éviter des stocks dus à une absence ou mauvaise coordination des flux de matières transportées.

La figure 4.12 illustre le traitement d'un aléa en vue de prévenir les ruptures, selon les divers degrés d'autonomie des décideurs locaux.

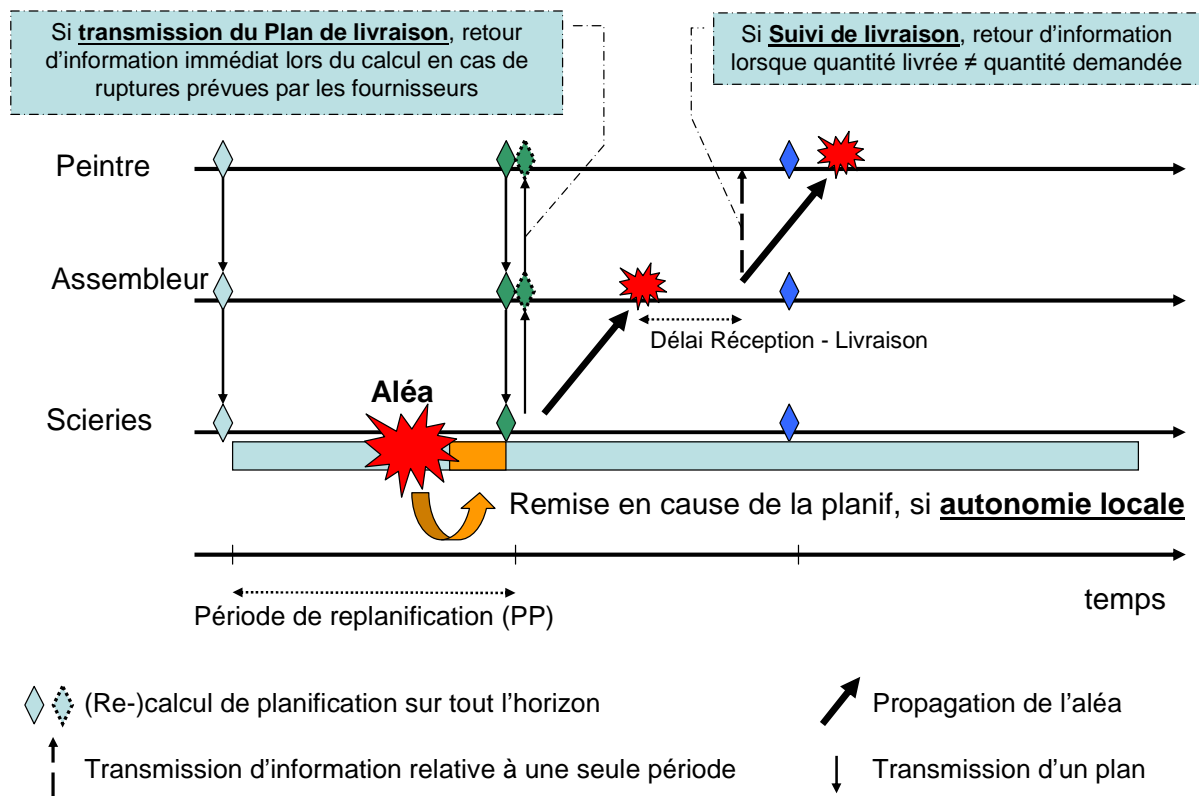


Figure 4.11 : Schématisation de l'autonomie locale et de la prévention des ruptures

L'analyse comparative des architectures de pilotage dans ce contexte s'appuie sur le même jeu de données (ou scénario) de référence que celui utilisé pour l'étude de la robustesse. Il est néanmoins important de noter que la solution de planification, ici obtenue à partir d'un calcul à horizon glissant, est sensiblement différente de celle obtenue sans remise en cause périodique des décisions (planification dite statique, utilisée pour l'analyse de la robustesse). Cette différence provient du fait que le principe de l'horizon glissant permet de mieux anticiper les demandes des clients au-delà des 40 premières périodes, alors qu'en planification statique aucune information n'est connue au-delà de la 40<sup>ème</sup> période.

Dans ce contexte, nous simulons différents scénarios, afin de mesurer l'impact des différents facteurs étudiés. Outre la prise en compte de l'autonomie et du degré de collaboration, la sensibilité de la solution de planification à la variation de la période de replanification est examinée. Plusieurs valeurs pour cette période de replanification sont ainsi considérées (égales à 3, 5 ou 10 périodes élémentaires). L'aléa de production que nous considérons dans la plupart des cas est alors une panne de machine de la scierie 1 apparaissant à la date 7. La durée de l'aléa varie de 1 à 8 périodes. A noter que, dans la suite de ce chapitre, la non apparition d'aléa sera (pour des questions d'homogénéisation de notations) représentée par un aléa de durée nulle. Les performances relatives aux différents cas de pilotage simulés sont appréhendées dans le même référentiel que celui utilisé pour l'étude de la robustesse.

#### **4.6.2 Les résultats de l'analyse de réactivité**

Le tableau 4.4 présente les résultats de 160 simulations effectuées en horizon glissant. Chaque valeur correspond à la moyenne obtenue sur 8 cas simulés dans lesquels la durée de la panne varie de 1 à 8 périodes.

| Type d'aléa   | Période de planification (PP) | Pilotes                          |                 |                  |               | Valeur moyenne |            |           | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | Différence avec centralisé |           |
|---|-------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|------------|-----------|--|------------|-----------|----------------------------|-----------|
|   |                               | Prévention rupture au niveau ... |                 | Autonomie locale | Performance   | Centralisé     | Par chaîne | Distribué | Centralisé                             | Par chaîne | Distribué | Par chaîne                 | Distribué |
|   |                               | ... Opérationnel                 | ... Décisionnel |                  |               |                |            |           |  |            |           |                            |           |
| Panne Production Scierie 1<br>8 cas simulés (durée variant de 1 à 8 périodes) | PP = 5                        | Non                              | Non             | Non              | Vente         | 737640,00      | 737640,00  | 731362,78 | 0,00                                   | 0,00       | -6277,22  | 0,00                       | -6277,22  |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Achat    | 347320,00      | 347320,00  | 344715,00 | 0,00                                   | 0,00       | -2605,00  | 0,00                       | -2605,00  |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Prod     | 28000,00       | 28000,00   | 27889,17  | 0,00                                   | 0,00       | -110,83   | 0,00                       | -110,83   |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Rupture  | 1083,50        | 1159,65    | 5219,83   | 1083,50                                | 1159,65    | 5219,83   | 76,15                      | 4136,33   |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Stock    | 136,52         | 155,77     | 422,59    | 136,52                                 | 155,77     | 422,59    | 19,25                      | 286,07    |
|   |                               |                                  |                 |                  | Profit        | 356150,18      | 356064,58  | 350592,38 | -1229,82                               | -1315,43   | -6787,62  | -85,60                     | -6557,79  |
|   |                               |                                  |                 |                  | Rupture       | 246,25         | 263,56     | 629,17    | 246,25                                 | 263,56     | 629,17    | 17,31                      | 382,92    |
|   |                               |                                  |                 |                  | Stock         | 1460,42        | 1599,94    | 4132,57   | 1460,42                                | 1599,94    | 4132,57   | 139,53                     | 2672,15   |
|   |                               |                                  |                 |                  | Coût Stock Er | 132,90         | 151,92     | 405,68    | 132,90                                 | 151,92     | 405,68    | 19,02                      | 272,78    |
|   |                               |                                  |                 |                  | Vente         | 737640,00      | 737640,00  | 732766,67 | 0,00                                   | 0,00       | -4873,33  | 0,00                       | -4873,33  |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Achat    | 347320,00      | 347320,00  | 345603,75 | 0,00                                   | 0,00       | -1716,25  | 0,00                       | -1716,25  |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Prod     | 28000,00       | 28000,00   | 27983,75  | 0,00                                   | 0,00       | -16,25    | 0,00                       | -16,25    |
|   |                               |                                  | Cout Rupture    | 693,00           | 774,65        | 3827,78        | 693,00     | 774,65    | 3827,78                                | 81,65      | 3134,78   |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Stock      | 87,67            | 104,44        | 236,29         | 87,67      | 104,44    | 236,29                                 | 16,77      | 148,61    |                            |           |
|   |                               |                                  | Profit          | 356593,03        | 356500,91     | 352443,70      | -786,97    | -879,09   | -4936,30                               | -92,12     | -4149,32  |                            |           |
|   |                               |                                  | Rupture         | 157,50           | 176,06        | 343,97         | 157,50     | 176,06    | 343,97                                 | 18,56      | 186,47    |                            |           |
|   |                               |                                  | Stock           | 947,37           | 1118,10       | 3200,32        | 947,37     | 1118,10   | 3200,32                                | 170,72     | 2252,95   |                            |           |
|   |                               |                                  | Coût Stock Er   | 86,80            | 101,95        | 192,96         | 86,80      | 101,95    | 192,96                                 | 15,15      | 106,16    |                            |           |
|   |                               |                                  | Vente           | 737640,00        | 737640,00     | 731827,50      | 0,00       | 0,00      | -5812,50                               | 0,00       | -5812,50  |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Achat      | 347320,00        | 347320,00     | 344488,75      | 0,00       | 0,00      | -2831,25                               | 0,00       | -2831,25  |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Prod       | 28000,00         | 28000,00      | 27947,50       | 0,00       | 0,00      | -52,50                                 | 0,00       | -52,50    |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Rupture    | 1083,50          | 1159,65       | 2932,28        | 1083,50    | 1159,65   | 2932,28                                | 76,15      | 1848,78   |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Stock      | 136,52           | 155,77        | 212,62         | 136,52     | 155,77    | 212,62                                 | 19,25      | 76,09     |                            |           |
|   |                               |                                  | Profit          | 356150,18        | 356064,58     | 352156,64      | -1229,82   | -1315,43  | -5223,36                               | -85,60     | -3993,54  |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 246,25          | 263,56           | 468,47        | 246,25         | 263,56     | 468,47    | 17,31                                  | 222,22     |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 1460,42         | 1599,94          | 2004,21       | 1460,42        | 1599,94    | 2004,21   | 139,53                                 | 543,79     |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 132,90          | 151,92           | 198,58        | 132,90         | 151,92     | 198,58    | 19,02                                  | 65,68      |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 733140,00     | 0,00           | 0,00       | -4500,00  | 0,00                                   | -4500,00   |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 345810,00     | 0,00           | 0,00       | -1510,00  | 0,00                                   | -1510,00   |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 27970,00      | 0,00           | 0,00       | -30,00    | 0,00                                   | -30,00     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 693,00          | 774,65           | 2493,11       | 693,00         | 774,65     | 2493,11   | 81,65                                  | 1800,11    |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 87,67           | 104,44           | 224,67        | 87,67          | 104,44     | 224,67    | 16,77                                  | 136,99     |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356593,03       | 356500,91        | 352161,66     | -786,97        | -879,09    | -5218,34  | -92,12                                 | -4431,37   |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 157,50          | 176,06           | 456,39        | 157,50         | 176,06     | 456,39    | 18,56                                  | 298,89     |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 947,37          | 1118,10          | 2353,43       | 947,37         | 1118,10    | 2353,43   | 170,72                                 | 1406,06    |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 86,80           | 101,95           | 187,80        | 86,80          | 101,95     | 187,80    | 15,15                                  | 101,00     |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 737629,25     | 0,00           | 0,00       | -10,75    | 0,00                                   | -10,75     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 347311,54     | 0,00           | 0,00       | -8,46     | 0,00                                   | -8,46      |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 27999,62      | 0,00           | 0,00       | -0,38     | 0,00                                   | -0,38      |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 1083,50         | 1159,65          | 3345,60       | 1083,50        | 1159,65    | 3345,60   | 76,15                                  | 2282,10    |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 136,52          | 155,77           | 256,08        | 136,52         | 155,77     | 256,08    | 19,25                                  | 119,56     |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356150,18       | 356064,58        | 355388,59     | -1229,82       | -1315,43   | -1991,41  | -85,60                                 | -761,58    |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 246,25          | 263,56           | 391,08        | 246,25         | 263,56     | 391,08    | 17,31                                  | 144,83     |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 1460,42         | 1599,25          | 2264,13       | 1460,42        | 1599,25    | 2264,13   | 138,83                                 | 803,72     |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 132,90          | 151,34           | 255,65        | 132,90         | 151,34     | 255,65    | 18,44                                  | 122,75     |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 737640,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 347320,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 28000,00      | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 693,00          | 774,65           | 1558,00       | 693,00         | 774,65     | 1558,00   | 81,65                                  | 865,00     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 87,67           | 104,44           | 88,80         | 87,67          | 104,44     | 88,80     | 16,77                                  | 1,12       |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356593,03       | 356500,91        | 356591,95     | -786,97        | -879,09    | -788,05   | -92,12                                 | -1,07      |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 157,50          | 176,06           | 157,50        | 157,50         | 176,06     | 157,50    | 18,56                                  | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 947,37          | 1118,10          | 946,25        | 947,37         | 1118,10    | 946,25    | 170,72                                 | -1,13      |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 86,80           | 101,95           | 86,09         | 86,80          | 101,95     | 86,09     | 15,15                                  | -0,71      |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 737640,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 347320,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 28000,00      | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 1083,50         | 1159,65          | 1359,50       | 1083,50        | 1159,65    | 1359,50   | 76,15                                  | 276,00     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 136,52          | 155,77           | 137,16        | 136,52         | 155,77     | 137,16    | 19,25                                  | 0,64       |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356150,18       | 356064,58        | 356149,54     | -1229,82       | -1315,43   | -1230,46  | -85,60                                 | -0,64      |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 246,25          | 263,56           | 246,25        | 246,25         | 263,56     | 246,25    | 17,31                                  | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 1460,42         | 1599,94          | 1440,42       | 1460,42        | 1599,94    | 1440,42   | 139,53                                 | -20,00     |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 134,23          | 151,92           | 133,87        | 134,23         | 151,92     | 133,87    | 17,68                                  | -0,36      |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 737640,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 347320,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 28000,00      | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 693,00          | 774,65           | 968,00        | 693,00         | 774,65     | 968,00    | 81,65                                  | 275,00     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 87,67           | 104,44           | 88,30         | 87,67          | 104,44     | 88,30     | 16,77                                  | 0,62       |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356593,03       | 356500,91        | 356592,45     | -786,97        | -879,09    | -787,55   | -92,12                                 | -0,58      |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 157,50          | 176,06           | 157,50        | 157,50         | 176,06     | 157,50    | 18,56                                  | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 947,37          | 1118,10          | 941,87        | 947,37         | 1118,10    | 941,87    | 170,72                                 | -5,50      |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 86,80           | 101,95           | 84,97         | 86,80          | 101,95     | 84,97     | 15,15                                  | -1,83      |           |                            |           |

| Type d'aléa   | Période de planification (PP) | Pilotages                        |                 |                  |              | Valeur moyenne |            |           | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | Différence avec centralisé |           |
|---|-------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|--------------|----------------|------------|-----------|--|------------|-----------|----------------------------|-----------|
|   |                               | Prévention rupture au niveau ... |                 | Autonomie locale | Performance  | Centralisé     | Par chaîne | Distribué | Centralisé                             | Par chaîne | Distribué | Par chaîne                 | Distribué |
|   |                               | ... Opérationnel                 | ... Décisionnel |                  |              |                |            |           |  |            |           |                            |           |
| Panne Production Scierie 1<br>8 cas simulés (durée variant de 1 à 8 périodes) | PP = 3                        | Oui                              | Non             | Non              | Vente        | 737640,00      | 737640,00  | 737640,00 | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      | 0,00                       | 0,00      |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Achat   | 347320,00      | 347320,00  | 347320,00 | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      | 0,00                       | 0,00      |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Prod    | 28000,00       | 28000,00   | 28000,00  | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      | 0,00                       | 0,00      |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Rupture | 913,00         | 984,08     | 2042,88   | 913,00                                 | 984,08     | 2042,88   | 71,08                      | 1129,88   |
|   |                               |                                  |                 |                  | Cout Stock   | 114,50         | 131,52     | 116,79    | 114,50                                 | 131,52     | 116,79    | 17,02                      | 2,29      |
|   |                               |                                  |                 |                  | Profit       | 356344,25      | 356264,41  | 356341,61 | -1035,75                               | -1115,59   | -1038,39  | -79,84                     | -2,64     |
|   |                               |                                  | Rupture         | 207,50           | 223,65       | 207,63         | 207,50     | 223,65    | 207,63                                 | 16,15      | 0,13      |                            |           |
|   |                               |                                  | Stock           | 1232,08          | 1365,73      | 1275,81        | 1232,08    | 1365,73   | 1275,81                                | 133,65     | 43,73     |                            |           |
|   |                               |                                  | Coût Stock Er   | 110,33           | 127,11       | 115,29         | 110,33     | 127,11    | 115,29                                 | 16,78      | 4,96      |                            |           |
|   |                               |                                  | Vente           | 737640,00        | 737640,00    | 737640,00      | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Achat      | 347320,00        | 347320,00    | 347320,00      | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      |                            |           |
|   |                               |                                  | Cout Prod       | 28000,00         | 28000,00     | 28000,00       | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       | 0,00      |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 693,00          | 774,65           | 1558,00      | 693,00         | 774,65     | 1558,00   | 81,65                                  | 865,00     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 87,22           | 103,85           | 88,19        | 87,22          | 103,85     | 88,19     | 16,63                                  | 0,96       |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356593,48       | 356501,49        | 356592,51    | -786,52        | -878,51    | -787,49   | -91,98                                 | -0,96      |           |                            |           |
|   |                               | Rupture                          | 157,50          | 176,06           | 157,50       | 157,50         | 176,06     | 157,50    | 18,56                                  | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Stock                            | 943,62          | 1110,42          | 956,25       | 943,62         | 1110,42    | 956,25    | 166,80                                 | 12,62      |           |                            |           |
|   |                               | Coût Stock Er                    | 85,60           | 100,23           | 86,73        | 85,60          | 100,23     | 86,73     | 14,63                                  | 1,13       |           |                            |           |
|   |                               | Vente                            | 737640,00       | 737640,00        | 737640,00    | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Achat                       | 347320,00       | 347320,00        | 347320,00    | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Prod                        | 28000,00        | 28000,00         | 28000,00     | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   | 0,00       |           |                            |           |
|   |                               | Cout Rupture                     | 913,00          | 984,08           | 1159,33      | 913,00         | 984,08     | 1159,33   | 71,08                                  | 246,33     |           |                            |           |
|   |                               | Cout Stock                       | 114,50          | 131,52           | 113,79       | 114,50         | 131,52     | 113,79    | 17,02                                  | -0,71      |           |                            |           |
|   |                               | Profit                           | 356344,25       | 356264,41        | 356356,06    | -1035,75       | -1115,59   | -1023,94  | -79,84                                 | 11,81      |           |                            |           |
|   | Rupture                       | 207,50                           | 223,65          | 205,00           | 207,50       | 223,65         | 205,00     | 16,15     | -2,50                                  |            |           |                            |           |
|   | Stock                         | 1232,08                          | 1365,73         | 1194,75          | 1232,08      | 1365,73        | 1194,75    | 133,65    | -37,33                                 |            |           |                            |           |
|   | Coût Stock Er                 | 110,33                           | 127,11          | 110,04           | 110,33       | 127,11         | 110,04     | 16,78     | -0,30                                  |            |           |                            |           |
|   | Vente                         | 737640,00                        | 737640,00       | 737640,00        | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Cout Achat                    | 347320,00                        | 347320,00       | 347320,00        | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Cout Prod                     | 28000,00                         | 28000,00        | 28000,00         | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Cout Rupture                  | 693,00                           | 774,65          | 912,33           | 693,00       | 774,65         | 912,33     | 81,65     | 219,33                                 |            |           |                            |           |
|   | Cout Stock                    | 87,22                            | 103,85          | 87,24            | 87,22        | 103,85         | 87,24      | 16,63     | 0,01                                   |            |           |                            |           |
|   | Profit                        | 356593,48                        | 356501,49       | 356593,46        | -786,52      | -878,51        | -786,54    | -91,98    | -0,01                                  |            |           |                            |           |
|   | Rupture                       | 157,50                           | 176,06          | 157,50           | 157,50       | 176,06         | 157,50     | 18,56     | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Stock                         | 943,62                           | 1110,42         | 945,12           | 943,62       | 1110,42        | 945,12     | 166,80    | 1,50                                   |            |           |                            |           |
|   | Coût Stock Er                 | 85,60                            | 100,23          | 84,40            | 85,60        | 100,23         | 84,40      | 14,63     | -1,20                                  |            |           |                            |           |
|   | Vente                         | 737640,00                        | 737640,00       | 737640,00        | 0,00         | 0,00           | -5000,00   | 0,00      | -5000,00                               |            |           |                            |           |
|   | Cout Achat                    | 347282,50                        | 347282,50       | 347320,00        | -37,50       | -37,50         | 0,00       | 0,00      | 37,50                                  |            |           |                            |           |
|   | Cout Prod                     | 28000,00                         | 28000,00        | 27925,00         | 0,00         | 0,00           | -75,00     | 0,00      | -75,00                                 |            |           |                            |           |
|   | Cout Rupture                  | 1798,50                          | 1874,65         | 7205,50          | 1798,50      | 1874,65        | 7205,50    | 76,15     | 5407,00                                |            |           |                            |           |
|   | Cout Stock                    | 245,02                           | 270,77          | 681,08           | 245,02       | 270,77         | 681,08     | 25,75     | 436,05                                 |            |           |                            |           |
|   | Profit                        | 355357,68                        | 355272,08       | 347836,57        | -2022,32     | -2107,93       | -9543,43   | -85,60    | -7521,10                               |            |           |                            |           |
|   | Rupture                       | 408,75                           | 426,06          | 888,75           | 408,75       | 426,06         | 888,75     | 17,31     | 480,00                                 |            |           |                            |           |
|   | Stock                         | 2473,04                          | 2654,51         | 5371,46          | 2473,04      | 2654,51        | 5371,46    | 181,47    | 2898,42                                |            |           |                            |           |
|   | Coût Stock Er                 | 241,48                           | 263,21          | 680,74           | 241,48       | 263,21         | 680,74     | 21,73     | 439,26                                 |            |           |                            |           |
|   | Vente                         | 737640,00                        | 737640,00       | 737640,00        | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Cout Achat                    | 347320,00                        | 347320,00       | 347320,00        | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
|   | Cout Prod                     | 28000,00                         | 28000,00        | 28000,00         | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      | 0,00                                   |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 693,00                        | 774,65                           | 1558,00         | 693,00           | 774,65       | 1558,00        | 81,65      | 865,00    |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 88,10                         | 99,76                            | 88,48           | 88,10            | 99,76        | 88,48          | 11,66      | 0,37      |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 356592,65                     | 356905,58                        | 356592,27       | -787,35          | -874,42      | -787,73        | -87,06     | -0,37     |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 157,50                        | 176,06                           | 157,50          | 157,50           | 176,06       | 157,50         | 18,56      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 939,79                        | 1059,57                          | 942,92          | 939,79           | 1059,57      | 942,92         | 119,78     | 3,12      |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 86,23                         | 98,40                            | 87,23           | 86,23            | 98,40        | 87,23          | 12,17      | 1,00      |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 737640,00                     | 737640,00                        | 737640,00       | 0,00             | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 347320,00                     | 347320,00                        | 347323,75       | 0,00             | 0,00         | 3,75           | 0,00       | 3,75      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28000,00                      | 28000,00                         | 28000,00        | 0,00             | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 1798,50                       | 1874,65                          | 3096,50         | 1798,50          | 1874,65      | 3096,50        | 76,15      | 1298,00   |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 227,52                        | 253,27                           | 226,86          | 227,52           | 253,27       | 226,86         | 25,75      | -0,67     |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 355337,68                     | 355252,08                        | 355334,64       | -2042,32         | -2127,93     | -2045,36       | -85,60     | -3,03     |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 408,75                        | 426,06                           | 408,75          | 408,75           | 426,06       | 408,75         | 17,31      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 2422,17                       | 2533,42                          | 2370,00         | 2422,17          | 2533,42      | 2370,00        | 111,26     | -52,17    |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 225,23                        | 249,42                           | 224,82          | 225,23           | 249,42       | 224,82         | 24,18      | -0,42     |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 737640,00                     | 737640,00                        | 737640,00       | 0,00             | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 347320,00                     | 347320,00                        | 347320,00       | 0,00             | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28000,00                      | 28000,00                         | 28000,00        | 0,00             | 0,00         | 0,00           | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 693,00                        | 774,65                           | 1450,00         | 693,00           | 774,65       | 1450,00        | 81,65      | 757,00    |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 88,44                         | 105,88                           | 88,60           | 88,44            | 105,88       | 88,60          | 17,44      | 0,17      |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 356592,31                     | 356499,47                        | 356592,15       | -787,69          | -880,53      | -787,85        | -92,84     | -0,17     |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 157,50                        | 176,06                           | 157,50          | 157,50           | 176,06       | 157,50         | 18,56      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 943,12                        | 1116,22                          | 940,29          | 943,12           | 1116,22      | 940,29         | 173,10     | -2,83     |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 86,56                         | 104,51                           | 86,73           | 86,56            | 104,51       | 86,73          | 17,95      | 0,17      |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 738900,00                     | 738573,08                        | 736400,00       | 1260,00          | 933,08       | -1240,00       | -326,92    | -2500,00  |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 348220,00                     | 348220,00                        | 348220,00       | 900,00           | 900,00       | 900,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28180,00                      | 28180,00                         | 28142,50        | 180,00           | 180,00       | 142,50         | 0,00       | -37,50    |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 4169,00                       | 4208,77                          | 9778,00         | 4169,00          | 4208,77      | 9778,00        | 39,77      | 5609,00   |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 98,83                         | 113,81                           | 276,28          | 98,83            | 113,81       | 276,28         | 14,99      | 177,45    |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 353277,68                     | 352910,49                        | 350094,22       | -4102,32         | -4469,51     | -7285,78       | -367,18    | -3183,45  |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 947,50                        | 956,54                           | 1065,00         | 947,50           | 956,54       | 1065,00        | 9,04       | 117,50    |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 2410,00                       | 2612,88                          | 6063,75         | 2410,00          | 2612,88      | 6063,75        | 202,88     | 3653,75   |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 45,20                         | 61,90                            | 275,28          | 45,20            | 61,90        | 275,28         | 16,70      | 230,08    |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 738900,00                     | 738573,08                        | 738900,00       | 1260,00          | 933,08       | 1260,00        | -326,92    | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 348220,00                     | 348220,00                        | 348220,00       | 900,00           | 900,00       | 900,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28180,00                      | 28180,00                         | 28180,00        | 180,00           | 180,00       | 180,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 4169,00                       | 4208,77                          | 9048,00         | 4169,00          | 4208,77      | 9048,00        | 39,77      | 4879,00   |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 98,83                         | 113,81                           | 155,53          | 98,83            | 113,81       | 155,53         | 14,99      | 56,70     |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 353277,68                     | 352910,49                        | 353175,47       | -4102,32         | -4469,51     | -4204,53       | -367,18    | -102,20   |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 947,50                        | 956,54                           | 952,50          | 947,50           | 956,54       | 952,50         | 9,04       | 5,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 2410,00                       | 2612,88                          | 5238,75         | 2410,00          | 2612,88      | 5238,75        | 202,88     | 2828,75   |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 45,20                         | 61,90                            | 154,53          | 45,20            | 61,90        | 154,53         | 16,70      | 109,33    |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 738900,00                     | 738573,08                        | 738900,00       | 1260,00          | 933,08       | 1260,00        | -326,92    | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 348220,00                     | 348220,00                        | 348220,00       | 900,00           | 900,00       | 900,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28180,00                      | 28180,00                         | 28180,00        | 180,00           | 180,00       | 180,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 4169,00                       | 4208,77                          | 4939,00         | 4169,00          | 4208,77      | 4939,00        | 39,77      | 770,00    |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 98,83                         | 113,81                           | 98,83           | 98,83            | 113,81       | 98,83          | 14,99      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 353277,68                     | 352910,49                        | 353277,68       | -4102,32         | -4469,51     | -4102,32       | -367,18    | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 947,50                        | 956,54                           | 947,50          | 947,50           | 956,54       | 947,50         | 9,04       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 2410,00                       | 2612,88                          | 2410,00         | 2410,00          | 2612,88      | 2410,00        | 202,88     | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 45,20                         | 61,90                            | 45,20           | 45,20            | 61,90        | 45,20          | 16,70      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Vente   | 738900,00                     | 738573,08                        | 738900,00       | 1260,00          | 933,08       | 1260,00        | -326,92    | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Achat  | 348220,00                     | 348220,00                        | 348220,00       | 900,00           | 900,00       | 900,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Prod   | 28180,00                      | 28180,00                         | 28180,00        | 180,00           | 180,00       | 180,00         | 0,00       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Cout Rupture  | 4169,00                       | 4208,77                          | 4939,00         | 4169,00          | 4208,77      | 4939,00        | 39,77      | 770,00    |  |            |           |                            |           |
| Cout Stock  | 98,83                         | 113,81                           | 98,83           | 98,83            | 113,81       | 98,83          | 14,99      | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Profit  | 353277,68                     | 352910,49                        | 353277,68       | -4102,32         | -4469,51     | -4102,32       | -367,18    | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Rupture   | 947,50                        | 956,54                           | 947,50          | 947,50           | 956,54       | 947,50         | 9,04       | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Stock   | 2410,00                       | 2612,88                          | 2410,00         | 2410,00          | 2612,88      | 2410,00        | 202,88     | 0,00      |  |            |           |                            |           |
| Coût Stock Er   | 45,20                         | 61,90                            | 45,20           | 45,20            | 61,90        | 45,20          | 16,70      | 0,00      |  |            |           |                            |           |

Tableau 4.4 : Résultats pour l'étude de la réactivité

### 4.6.3 Analyse des résultats

L'analyse de ces résultats vise à comparer les performances des trois pilotages en fonction : i) du degré de collaboration et d'autonomie des partenaires, ii) de la période de replanification, et enfin iii) du type d'aléa.

#### 1) Impact du degré de collaboration et d'autonomie des partenaires

Cette comparaison se fait avec une panne de production dans la scierie 1 et une période de replanification fixe de 5 périodes.

La figure 4.13 illustre les résultats obtenus avec la même représentation que pour de l'étude de la robustesse. La notation « S.P.A » utilisée sur la figure représente, dans le même ordre que le tableau 4.4, la période de replanification, la présence (S) ou non ( \_ ) de Suivi de livraison, la transmission ou non du Plan de livraison (P ou \_ ), et la présence ou non d'Autonomie locale (A ou \_ ).

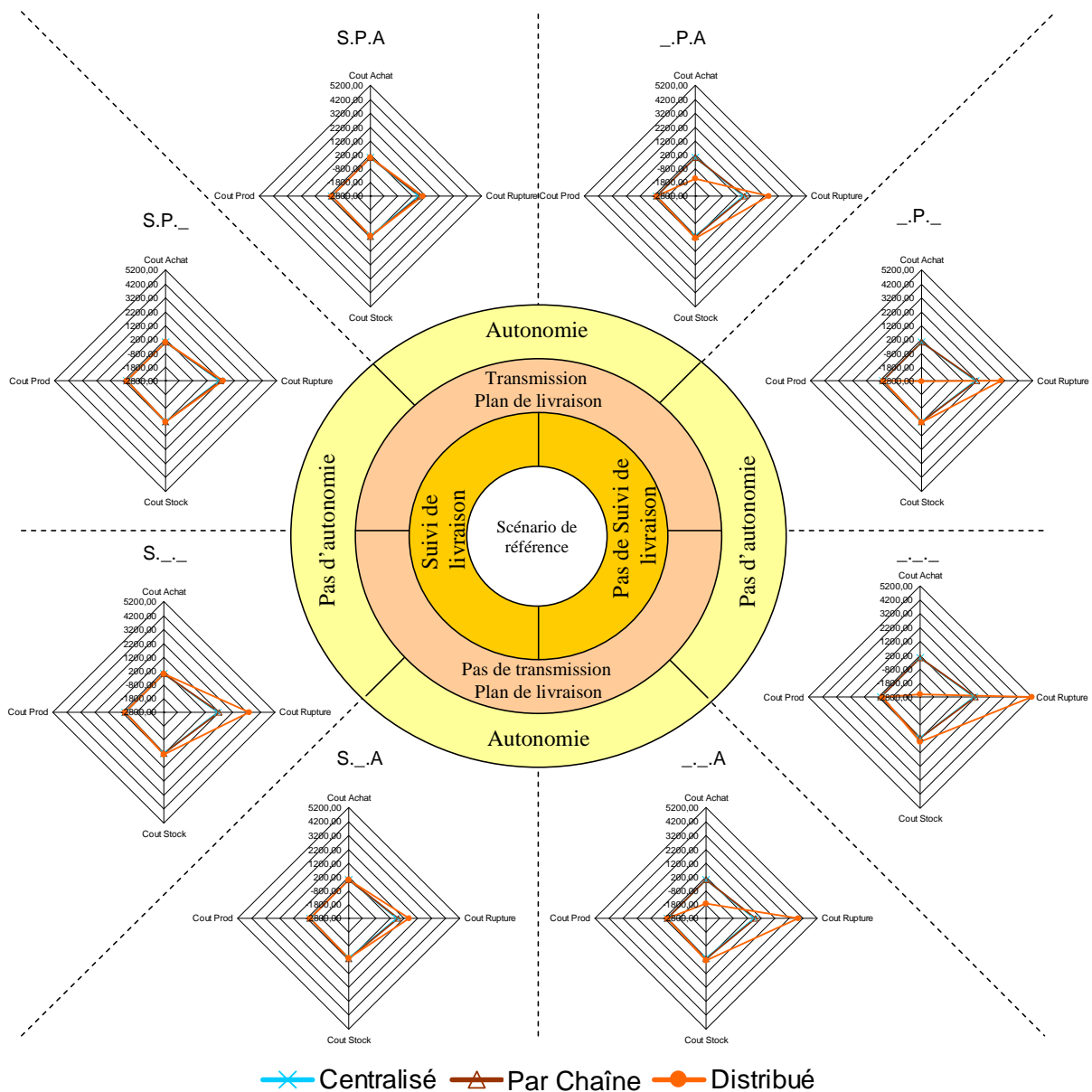


Figure 4.12 : Comparaison des coûts des trois pilotages en fonction du degré de collaboration et d'autonomie



Nous pouvons noter que l'absence de suivi apporte de mauvais résultats au pilotage distribué : environ 4 à 6 fois plus de perte de profit qu'avec le pilotage centralisé. Lorsque le suivi permet au client de prendre connaissance des variations sur les quantités livrées, sans qu'aucune forme de collaboration ni d'autonomie (S.\_.) ne soit autorisée, les résultats du pilotage distribué sont certes améliorés, mais ses performances restent en deçà de celles des autres pilotages: 1,6 fois plus de perte qu'avec le pilotage centralisé.

Enfin, en autorisant la transmission du plan de livraison et / ou l'autonomie locale, les résultats du pilotage distribué deviennent alors comparables à ceux du pilotage centralisé. Le pilotage par chaîne est alors le moins performant, du fait de l'absence de négociation dans la nécessité de bien répartir la capacité de production de l'assembleur.

La figure 4.15 montre les pertes de profit par rapport au scénario de référence (sans aléa) en fonction des différentes situations de pilotage couplant collaboration et autonomie.

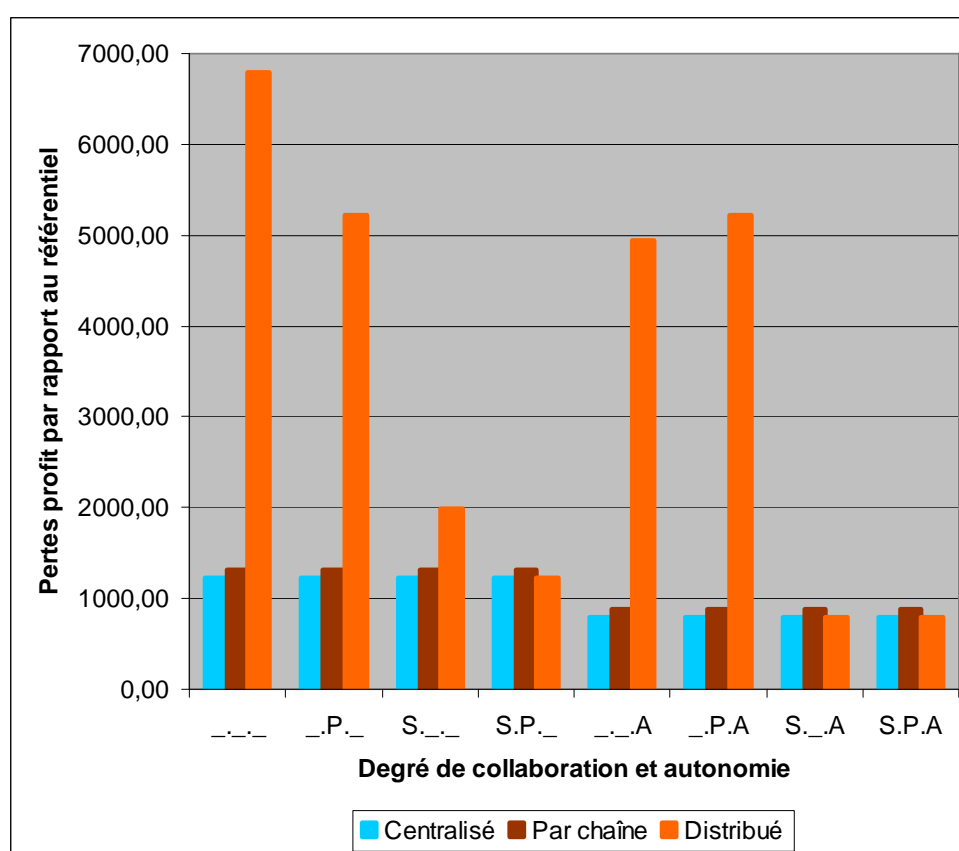


Figure 4.13 : Pertes de profit par rapport au référentiel en fonction du degré de collaboration et d'autonomie

Cette figure nous permet de conclure sur un certain nombre de points :

- 1) On constate l'incidence du suivi (cas S.x.x) sur la performance de la chaîne logistique ; l'absence de suivi est la cause essentielle d'une mauvaise performance du pilotage, quelle que soit l'architecture considérée. Nous supposons donc, dans la suite des expérimentations, l'existence systématique d'un suivi de livraison.

- 2) La transmission du plan de livraison du fournisseur au client, associé au suivi (cas S.P.x), est un facteur de performance, quel que soit le niveau d'autonomie laissée à la prise de décision locale. Dans un tel cas, la performance du pilotage distribué est proche de celle du pilotage centralisé.
  
- 3) L'autonomie locale reste la meilleure façon d'améliorer la performance de la chaîne logistique pour toute architecture de pilotage (cas x.x.A). Couplée à un suivi, l'autonomie locale conduit à des pertes de profit, dans le cas d'un pilotage distribué, sensiblement équivalentes à celles du pilotage centralisé. De plus, nous constatons une tendance globale de réduction de pertes, toutes architectures de pilotage confondues.

#### 2) Impact de la période de replanification

L'étude porte sur l'estimation de l'impact de la durée de la période de planification sur les performances des pilotages. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- La perturbation considérée est une panne de production dans la scierie 1.
- Comme mentionné précédemment, nous considérons qu'il existe un suivi des livraisons liant le client au fournisseur (cas S.x.x).
- Les autres situations possibles sont analysées moyennant une période de replanification égale à 3, 5 ou 10 périodes élémentaires.

La figure 4.15 présente les résultats des scénarios étudiés :

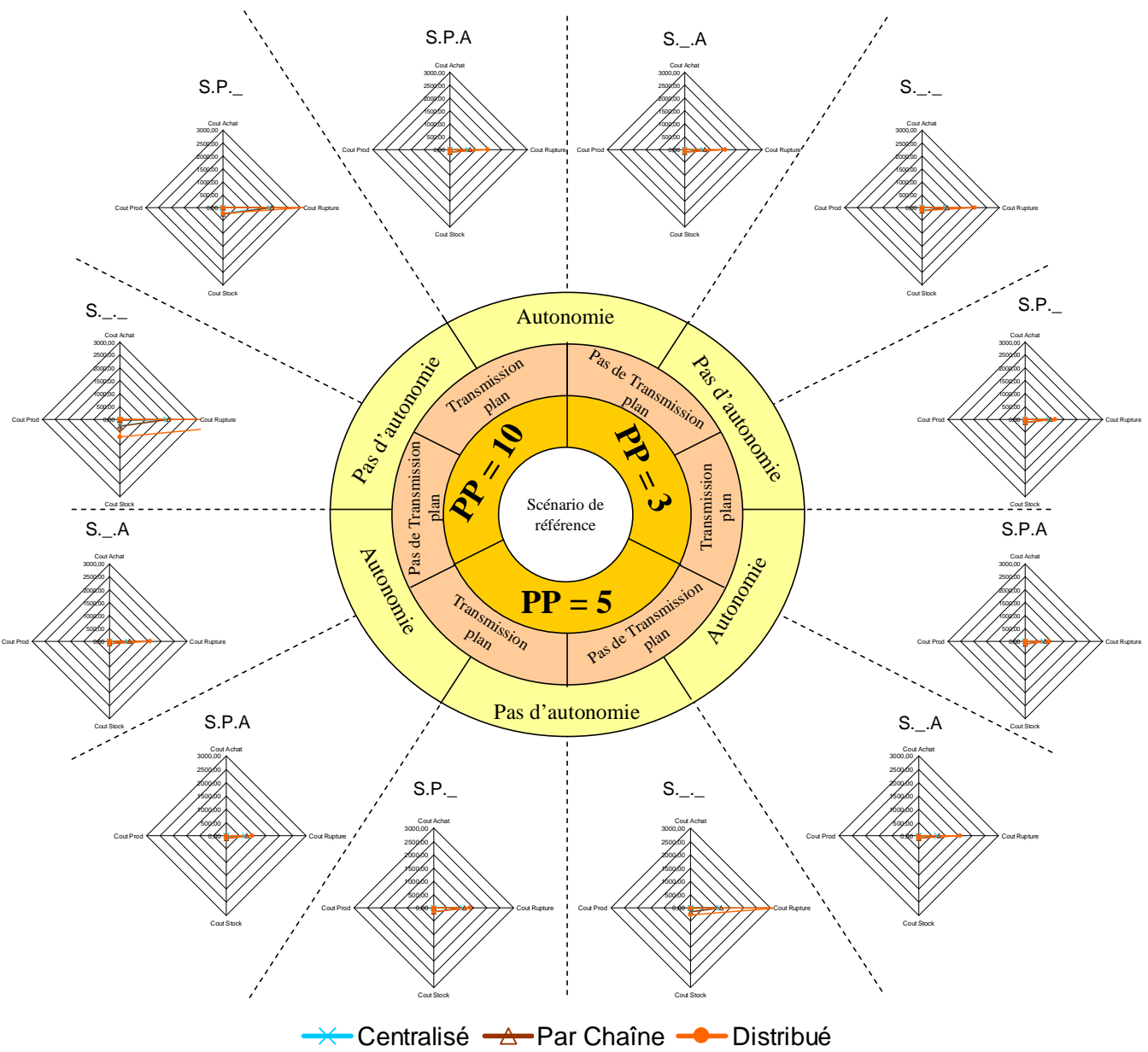


Figure 4.14 : Comparaison des coûts des trois types de pilotage en fonction de la période de replanification

L'analyse nous amène au constat suivant : hormis le cas où le plan de livraison n'est jamais transmis, alors que les centres de décision locaux ne disposent d'aucune autonomie dans leur décision (S.\_.\_), les pilotages distribué et centralisé présentent un niveau de performance quasi-identique, quelle que soit la valeur de la période de replanification. Le pilotage par chaîne est celui qui présente la performance la plus dégradée.

De plus, une augmentation de la période de planification conduit à une réduction du profit. Cette tendance non observable sur la figure 4.15 mais décelable dans le tableau 4.5 (l'écart de profit avec le scénario de référence augmente en valeur absolue) est clairement identifiable sur la figure 4.16.

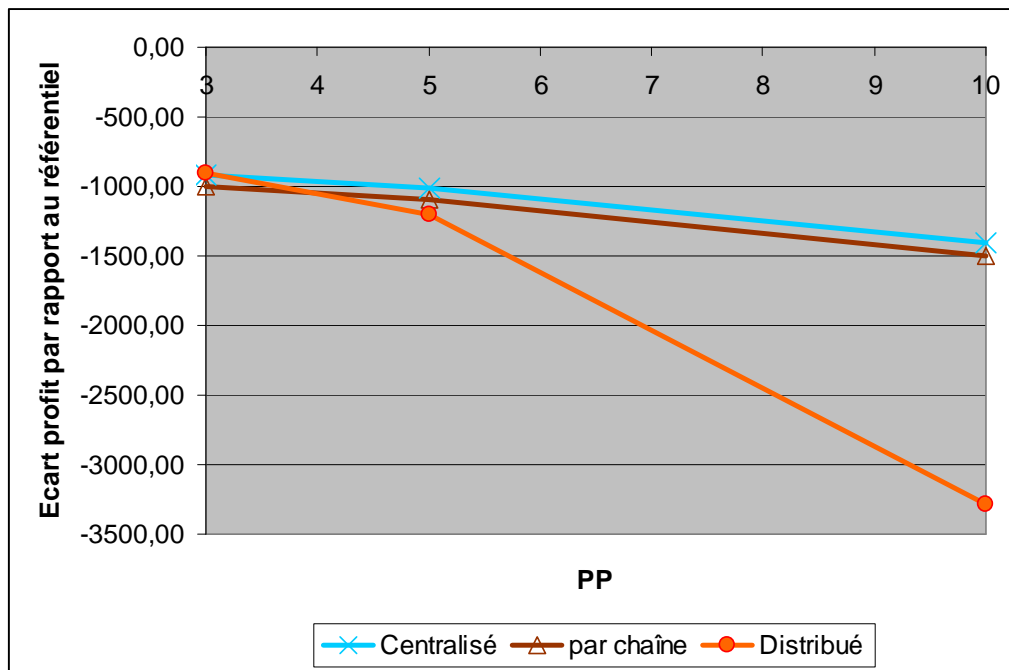


Figure 4.15 : Ecart moyen du profit par rapport au référentiel en fonction de la période de replanification

La raison principale de cette diminution du profit est la dégradation de l'aptitude du pilotage à réagir promptement aux aléas (réactivité). Nous remarquons cependant une diminution de faible amplitude et quasi-linéaire pour les pilotages centralisés et par chaîne, alors que les performances se dégradent plus brutalement pour le pilotage distribué.

### 3) Impact du type d'aléa

Nous considérons ici une période de planification fixe ( $PP = 5$ ) et mettons en œuvre un suivi des livraisons entre client et fournisseur (S.x.x). Deux types d'aléa sont simulés, intervenant tous les deux à la date 7 :

- une panne de production dans la scierie 1, sans que cette dernière ne cause de perte de matière première,
- une panne de transport entre la scierie 1 et l'assembleur, avec perte des matières transportées.

La figure 4.17 illustre les résultats obtenus :

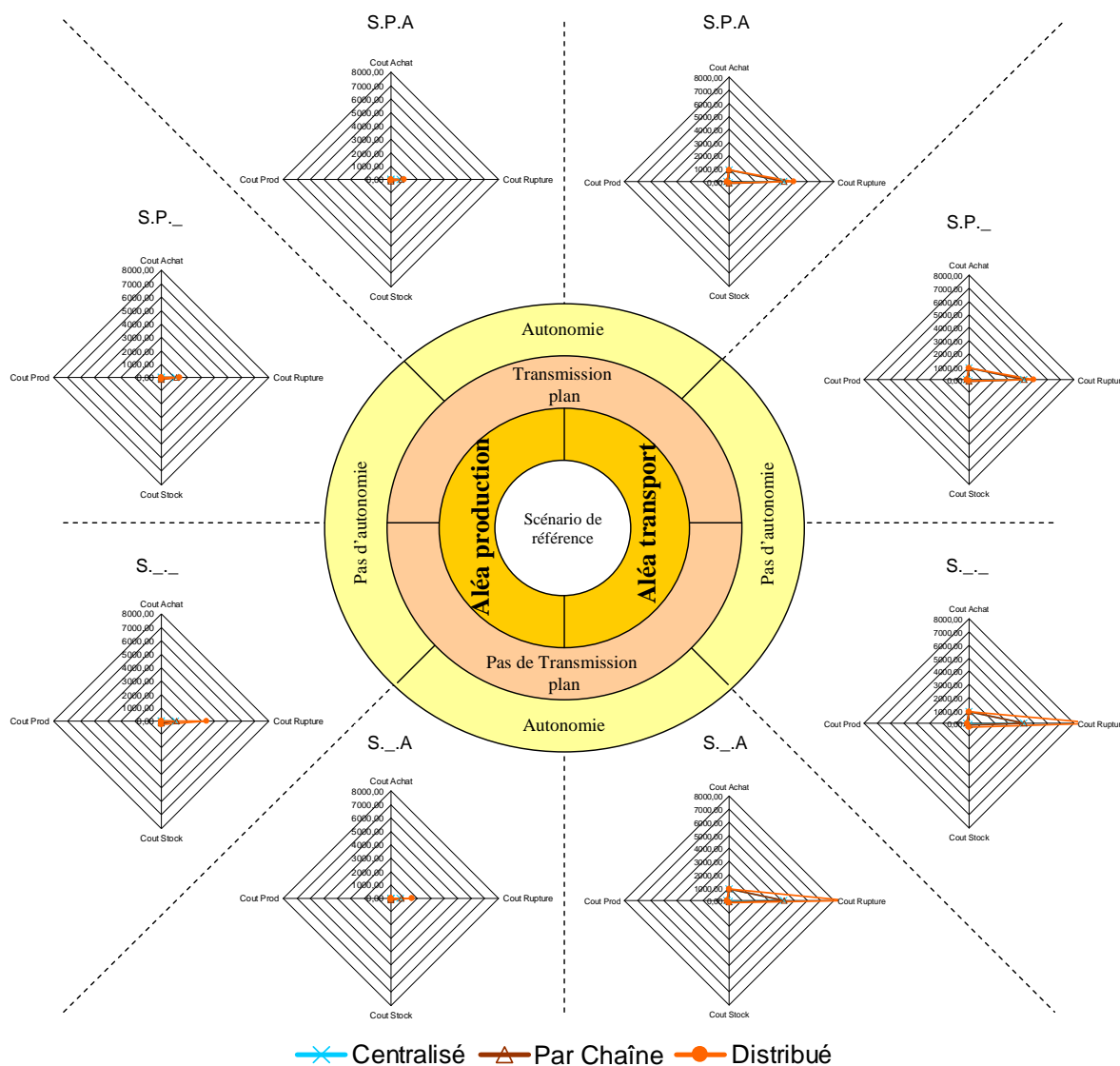


Figure 4.16 : Comparaison des coûts des trois pilotages en fonction du type d'aléa

D'après le tableau 4.5, la comparaison des pilotages montre que, du point de vue du profit, nous retrouvons les mêmes phénomènes que précédemment (résultats dégradés pour le pilotage distribué dans le cas S.\_., et dans les autres cas sensiblement équivalents aux résultats obtenus avec pilotage centralisé).

Cependant (mis à part les cas S.\_.), si l'on regarde plus en détail les ruptures, on remarque qu'en présence d'un aléa de transport, le nombre de ruptures est quasi-équivalent pour tous les pilotages, ce qui n'est pas le cas lors d'un aléa de production : le pilotage par chaîne génère plus de ruptures.

D'un autre côté, concernant les coûts de stockage, mis à part les cas S.\_., le pilotage par chaîne est toujours moins performant, sauf dans le cas d'un aléa de transport avec autonomie locale et sans transmission du plan de livraison (S.\_.A), où c'est le pilotage distribué qui est en nette difficulté. Cela provient du fait que, sans échange de plan de livraison au niveau décisionnel, l'entreprise d'assemblage sait qu'elle ne pourra pas livrer le peintre pendant une certaine durée, mais ne lui communique cette information qu'au « goutte à goutte ». En attendant, le peintre pense qu'il va recevoir ses commandes de manière imminente et continue ainsi à commander de la peinture, qu'il stocke en attendant de recevoir effectivement les produits à peindre.

En comparant les écarts moyens de profit pour tous les cas de collaboration ou d'autonomie, on remarque que les résultats sont très proches lors d'un aléa de production et plus dispersés lors d'un aléa de transport (cf. figure 4.18).

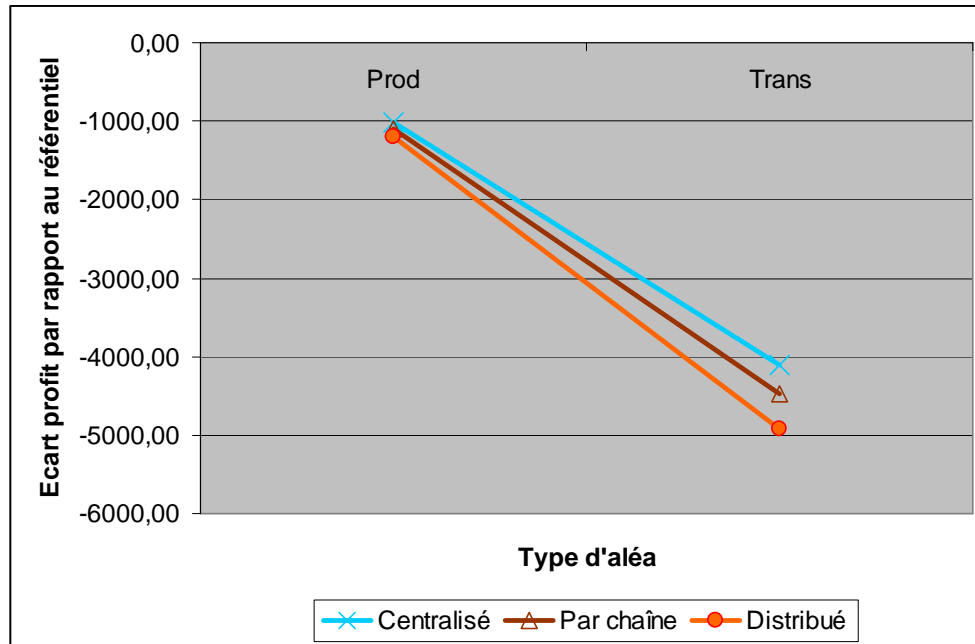


Figure 4.17 : Ecart moyen du profit par rapport au référentiel en fonction du type d'aléa

De plus, les pertes sont environ 4 fois plus importantes lors d'un aléa de transport que lors d'un aléa de production. Mais il faut rappeler que, en présence d'un aléa de transport, nous avons considéré que la marchandise était perdue. Dans ces conditions, il faut donc racheter les matières premières et refaire les produits perdus, d'où des coûts plus importants.

#### 4.6.4 Conclusions sur l'étude de la réactivité

Pour améliorer les performances du pilotage distribué en horizon glissant, il est clair que le suivi de livraison est nécessaire. Si, en plus, des échanges de plan de livraison sont possibles ou s'il existe une autonomie décisionnelle locale pour toutes les entreprises de la chaîne, alors on retrouve les résultats optimaux du pilotage centralisé. On vérifie donc que, plus tôt on prévient le client de futures ruptures, mieux ce dernier pourra replanifier ses activités et passer ses commandes à ses autres fournisseurs pour synchroniser les flux et éviter des stocks, et ainsi améliorer les performances de l'ensemble de la chaîne.

Donc, pour ces types d'aléa, il suffit que les acteurs s'informent de leurs plans de livraison en cas de rupture pour trouver un résultat optimal (en référence au pilotage centralisé).

D'après les résultats obtenus, si l'on devait définir des règles d'or de réactivité, il faudrait :

- 1) d'abord assurer le suivi de livraison,
- 2) puis assurer l'autonomie décisionnelle locale,
- 3) et enfin assurer la transmission de l'ensemble du plan de livraison.

Si l'on considère les résultats tous pilotages confondus, l'autonomie locale prime sur tous les autres paramètres. C'est en effet la meilleure façon de réagir face à un aléa : la réaction est recherchée dès que l'aléa se produit.

Concernant la valeur de la période de replanification (PP), celle-ci joue un rôle important dans la « chute » du profit en fonction de la durée de l'aléa. En effet, plus PP est petit, plus le système est réactif. Cependant cela demande une mise à jour régulière des informations, ce qui peut engendrer aussi des frais, qui ne sont pas pris en compte dans ces présents travaux.

## **4.7 Conclusion du chapitre**

Comme nous l'attendions, le pilotage centralisé obtient les meilleures performances quels que soient les variations ou les aléas.

Dans l'étude de la robustesse, nous avons remarqué qu'une variation de la demande ou de l'approvisionnement modifie profondément la solution du scénario de référence. Ceci montre bien que la maîtrise des approvisionnements est tout aussi importante que la prévision des commandes. Beaucoup d'études portent sur l'incertitude de la demande ou les prévisions de demande, mais il ne nous semble pas qu'une telle attention soit portée vers les approvisionnements, qui sont aussi incertains d'une certaine façon (risque d'aléa chez le fournisseur de production ou de transport). Naturellement, ce facteur n'est réellement critique qu'en situation de flux tendu sur la chaîne (sinon, il suffit de prévoir un stock de sécurité).

Si le pilotage est distribué, nous avons vu qu'un certain niveau de collaboration entre les acteurs tout au long de la chaîne, ajouté à une autonomie locale suffisante, permet de réagir rapidement face à un aléa, auquel cas le pilotage distribué est tout aussi performant que le pilotage centralisé.

Concernant le pilotage par chaîne, celui-ci mime les réactions du pilotage centralisé, avec toutefois une mauvaise gestion de la capacité de production de l'assembleur, maillon commun aux deux chaînes logistiques. Les paramètres de ce pilotage par chaîne (pré-partage à 50-50 de la capacité notamment) sont en fait mal réglés. Nous les corrigerons dans le chapitre suivant.

---

## Chapitre 5

# Analyse du couplage de plusieurs réseaux logistiques

---

Sommaire :

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | Introduction .....   | 144 |
| 5.2   | Le problème d'allocation des capacités d'un maillon commun.....        | 145 |
| 5.2.1 | Positionnement du problème .....                                       | 145 |
| 5.2.2 | Définition du processus de négociation .....                           | 146 |
| 5.2.3 | Incidences sur le modèle de planification .....                        | 147 |
| 5.3   | Cadre de l'expérimentation .....                                       | 149 |
| 5.3.1 | Facteurs reflétant la stratégie de négociation .....                   | 149 |
| 5.3.2 | Campagne d'expérimentations .....                                      | 152 |
| 5.3.3 | Mesure de la performance .....   | 153 |
| 5.4   | Analyse des résultats d'expérimentations .....                         | 157 |
| 5.4.1 | Influence de la répartition initiale de la capacité.....               | 157 |
| 5.4.2 | Influence de la sur-réservation / sous-réservation de la capacité..... | 159 |
| 5.4.3 | Respect des plans de production .....                                  | 162 |
| 5.4.4 | Respect des plans d'approvisionnement .....                            | 163 |
| 5.5   | Amélioration de la convergence du processus de négociation.....        | 165 |
| 5.5.1 | Définition de nouvelles stratégies facilitant la convergence.....      | 165 |
| 5.5.2 | Expérimentations des stratégies .....                                  | 166 |
| 5.6   | Conclusion du chapitre.....  | 168 |



## 5 Analyse du couplage de plusieurs réseaux logistiques

### 5.1 Introduction

Le partage de l'activité d'un acteur industriel soumis aux demandes de différents clients pose, en gestion de production, un problème de réservation des capacités de production (pouvant être vu sous l'angle d'un problème d'allocation de charges à des ressources de capacités finies) dédiées à chaque client. Lorsque cette problématique se traite au périmètre d'une entreprise, les décisions locales visent à assurer le meilleur profit local, ce dernier n'étant pas toujours uniquement estimé sur un plan économique; par exemple, certains clients sont susceptibles d'être prioritairement servis, en raison de leur position stratégique sur le secteur de marché où l'entreprise veut développer son activité. Quels que soient les critères guidant l'allocation des capacités, la solution adoptée est souvent considérée comme optimale vis-à-vis de la performance globale recherchée par l'entreprise, d'autant que :

- ces critères traduisent souvent un compromis jugé optimal entre performances antagonistes (telles que minimisation des délais, minimisation des coûts, maximisation de la qualité, ...),
- l'accès, en absence de problème de confidentialité des données, à l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision garantit à celle-ci une solution pertinente.

Dans le cadre de chaînes logistiques dont le pilotage est organisé de manière totalement distribuée, où chaque acteur est autonome dans la gestion de son activité de production et répond aux sollicitations de différents clients, cette problématique ne diffère guère de ce qui précède. Elle peut cependant prendre une dimension complexe lorsque certaines entreprises sont des acteurs incontournables de **plusieurs chaînes logistiques**, où les activités sont coordonnées au périmètre de chaque chaîne via un pilotage centralisé ; le pilotage abordé dans sa globalité peut être alors considéré comme un pilotage « par chaîne » et « semi-distribué » à l'échelle des différents partenaires dont les activités sont rendues interdépendantes par l'existence de ce partenaire commun.

Dans un tel contexte, chaque maillon commun est sollicité par des demandes en production émanant de centres de décision hiérarchiquement supérieurs (centres en charge de piloter dans son ensemble chaque chaîne logistique). Le processus de partage de capacité s'appuie alors sur une recherche de satisfaction de plusieurs objectifs pouvant s'avérer antagonistes, tels que :

- la recherche de maximisation du profit local,
- la nécessité de satisfaire l'ensemble des demandes lui parvenant, de par la nature contractuelle des relations qui le lient aux partenaires des différentes chaînes logistiques (et donc aux centres de décision hiérarchiquement supérieurs). La recherche de maximisation du profit se fait à l'échelle de la chaîne, conjointement à un partage des risques.

C'est en terme de compromis qu'une solution à ce problème doit être trouvée, pouvant amener d'après négociations lorsque la charge de travail induite par les demandes en production dépasse la capacité disponible de manière conséquente. De multiples stratégies de résolutions sont alors envisageables pour simuler un tel processus décisionnel, dont certaines peuvent s'appuyer sur un principe de « poker menteur » : un partenaire impliqué dans différents chaînes peut par exemple volontairement surestimer la capacité qu'il dit allouée à chacune d'entre elles ; à réception des demandes, le maillon commun s'autorise ainsi la possibilité d'une allocation de capacité répondant davantage à la maximisation de son propre profit, qu'à la satisfaction de l'ensemble des partenaires le sollicitant.

Dans ce chapitre, nous ne prétendons pas étudier d'une manière exhaustive l'ensemble des stratégies de résolution de ce problème de partage de capacité. Placée dans le cadre d'une planification d'activités répondant à la problématique décrite plus haut, l'étude expérimentale menée cherche plutôt, à l'image des analyses réalisées dans le chapitre précédent, à caractériser la sensibilité de la solution (et donc du modèle) à la variation de certains paramètres, qui se veulent représentatifs de quelques stratégies de partage de capacité. L'objectif sous-jacent est l'estimation de l'incidence des stratégies de résolution locale sur les performances des chaînes étudiées dans leur globalité.

## **5.2 Le problème d'allocation des capacités d'un maillon commun**

Après avoir posé le problème d'allocation, nous définissons le processus de négociation des capacités et discutons de son impact sur les performances des chaînes couplées, constatées à propos du cas-type et de notre modèle de planification.

### **5.2.1 Positionnement du problème**

Le problème d'allocation de capacité est déjà étudié dans la littérature scientifique et en général abordé sous l'angle de deux problèmes distincts :

- *La conception des chaînes logistiques* : dans les travaux menés dans ce cadre, la variation de la capacité de production au sein d'une chaîne logistique est traitée sous l'angle du dimensionnement et de la localisation des acteurs dans un réseau d'entreprises. Ainsi, Syarif and al. (2002) étudient l'efficacité d'un réseau logistique en s'intéressant aux problèmes d'allocation et de localisation des charges induites par une production distribuée sur différents équipements et partenaires. Les solutions sont obtenues à partir d'un modèle analytique travaillant sur les quantités de produits allouées en fabrication à chaque usine et les quantités transportées entre les acteurs du réseau. Les capacités des équipements sont considérées comme constantes, mais la possibilité de faire travailler tout ou partie de l'ensemble des usines est une manière de dimensionner la capacité de la chaîne logistique en fonction du besoin client. Melo and al. (2006) proposent une extension de cette approche en permettant une augmentation et/ou réduction progressive de la capacité de chaque usine. Korpela and al. (2002) proposent une distribution de la capacité d'un fournisseur en fonction de l'importance stratégique des clients (ou préférences) et le risque commercial et technique encouru (caractérisant les relations qui lient le fournisseur à ses clients).
- *La planification des chaînes logistiques* : une partie des écrits dans le domaine traitant du problème de partage de capacité s'intéresse à la « planification collaborative ». Si les approches classiques de planification consistent à définir le processus de calcul

des quantités à produire, sous contraintes de temps et de capacité, par des ressources multiples et cumulatives, la planification collaborative se focalise plus particulièrement sur les interactions entre clients et fournisseurs, conduisant à l'élaboration des plans de production propres à chacun, mettant ainsi en avant le caractère distribué de la décision. Dans ce contexte, la plupart des travaux font état de la négociation qui est menée entre clients et fournisseurs, du fait de poursuites d'objectifs fondamentalement opposés : un client cherche à obtenir pour son propre profit la capacité maximum chez ses fournisseurs, alors que chaque fournisseur tend à lui réserver un minimum de capacité pour optimiser la charge allouée à ses ressources, et augmenter le nombre de ses clients. Dudek and al. (2005) proposent dans cette logique un processus de négociation tendant à faciliter la synchronisation des productions entre partenaires d'une même chaîne logistique. Brandolese and al. (2000) fournissent une architecture basée sur une approche multi-agents pour simuler de tels processus de négociation. D'autres auteurs, tels que Spitter and al. (2005), préfèrent développer un modèle de planification global travaillant sur une adaptation des capacités des équipements alloués à la fabrication des produits en fonction des niveaux de satisfaction de la demande client et de maîtrise des coûts recherchés.

La problématique à laquelle nous nous intéressons dans le cadre de ce travail relève de la planification des chaînes logistiques. Notre analyse se centre sur la discussion qu'un acteur, soumis à différentes demandes en produits, doit entreprendre avec ses clients dans l'optique de gérer au mieux sa capacité de production.

### **5.2.2 Définition du processus de négociation**

Une négociation est considérée de manière générale comme un processus de recherche d'un accord liant deux ou plusieurs partenaires, centrés sur des intérêts communs et quantifiables. Ce processus est occasionné par l'existence d'un problème pour lequel il est impossible de trouver une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes imposées par les différents interlocuteurs. Il s'ensuit une confrontation entre ces derniers dont le but est de relâcher certaines contraintes dans une logique de concession mutuelle.

Lorsqu'une telle négociation se fait en mode coopératif, le processus conduit généralement à un accord où l'ensemble des parties s'estime gagnant (accord gagnant-gagnant, où chaque partenaire considère l'intérêt des autres : il ne s'agit pas de privilégier le partage de profit mais de trouver la solution qui maximise le profit de chaque acteur). Si la négociation se déroule en mode compétitif ou distributif, l'accord obtenu est dit gagnant-perdant, voire perdant-perdant. A l'extrême, un processus de négociation peut échouer pour différentes raisons :

- en omettant les intérêts et valeurs des autres partenaires,
- en refusant systématiquement de communiquer l'information utile,
- en maintenant systématiquement un haut niveau de confidentialité des données,
- en exigeant la totalité des avantages à des fins individuelles,

et tendre à créer une situation de crispation pouvant conduire à une maximisation des pertes pour chaque partenaire.

Dans notre étude, le processus de négociation est basé sur un échange itératif d'informations relatives aux plans de production et aux capacités restant disponibles, traduisant la relaxation progressive de certaines contraintes. L'analyse qui suit se limite au cas d'un partenaire impliqué dans deux chaînes logistiques ; néanmoins, les différents points discutés sont, selon nous, généralisables au cas de couplage de N réseaux logistiques.

L'étape préalable au processus de négociation (figure 5.1) concerne le partenaire (ou maillon commun) impliqué dans les deux chaînes. Celui-ci informe les centres pilotant les chaînes de la capacité qu'il a réservée pour la production des différents produits (lien 0). Les décisions de pilotage au niveau de chaque chaîne consistent en l'élaboration d'un plan de production en fonction des demandes clients (liens 1), qui est alors transmis au maillon commun (lien 2). La négociation s'engage réellement lorsqu'apparaît un conflit, conséquence de l'une des deux situations suivantes:

- la charge de travail allouée par l'un des centres de décision hiérarchiques est supérieure à la capacité que le partenaire a initialement réservée à cet effet,
- la charge totale de travail induite par les demandes émanant des deux centres de décision hiérarchiques est supérieure à la capacité totale du partenaire.

Devant l'impossibilité de satisfaire la demande, le maillon commun renvoie le résultat de sa propre planification à chacun des centres hiérarchiquement supérieurs (lien 3). Il traduit ainsi sa volonté de satisfaire au mieux la demande des centres et manifeste une répartition de la capacité lui assurant le meilleur profit. Sur la base de ces nouvelles informations (nouvelle répartition de la capacité proposée par le maillon commun), les centres de niveau supérieur calculent de nouveaux plans tenant compte des nouvelles contraintes imposées par le maillon commun et font une nouvelle proposition à ce dernier (lien 2'). Les échanges se poursuivent ainsi de manière itérative jusqu'à validation des plans par le partenaire commun (lien 3').

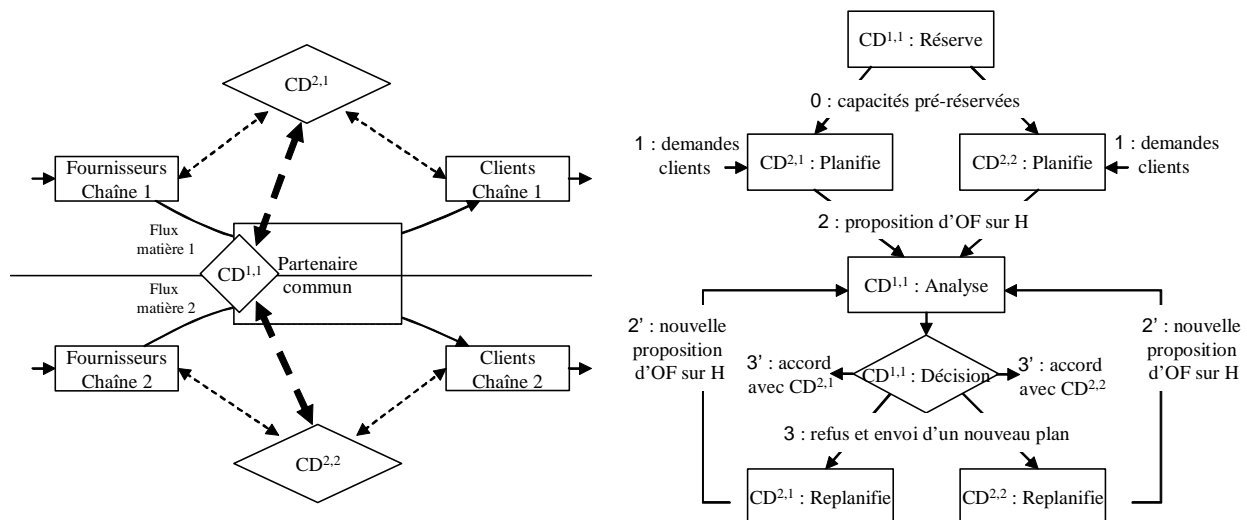


Figure 5.1 : Négociation des capacités du maillon commun : échanges d'information

### 5.2.3 Incidences sur le modèle de planification

La mise en œuvre du processus de négociation est l'objet même de l'expression, au sein du critère de planification optimale, du coût des pénalités. Pour mémoire, ce dernier coût s'exprime sous la forme suivante :

$$C_{\text{pénalités}} = \sum_{t \in H} \left( \sum_{r' \in E_r / r \in \bar{E}} \sum_{p \in P_r} \phi_p |f_{r',p}(t) - O_{r',p}(t)| + \sum_{r' \in E} \sum_{r \in E_r} \sum_{p \in P_r} \lambda_p |q_{r',r,p}(t) - C_{r',r,p}(t)| \right) \quad (15)$$

Le critère dans sa globalité caractérise à la fois la recherche du profit maximal, et ce coût de pénalités liées au non respect des consignes de production et d'approvisionnement imposées par des centres hiérarchiquement supérieurs.

Dans cette expression, les paramètres  $\Phi_p$  et  $\lambda_p$  expriment le choix du décideur (en charge de la planification) dans la pondération du respect ou non des plans de production et/ou des plans de réception des produits, tels qu'ils sont transmis par les centres hiérarchiques. Chaque paramètre dans sa valeur représente le coût lié au non respect du plan concerné qui vient pénaliser le profit. L'écart relatif entre les valeurs de ces deux paramètres modélise la préférence du décideur et conditionne en partie la convergence du processus de négociation, et l'issue de la négociation (accord ou refus).

De plus, le caractère itératif du processus de négociation (que nous étudions) est lié aux différentes étapes de concertation entre centres de décision dans la répartition de la capacité (relaxation progressive de contraintes jusqu'à converger vers une solution consensuelle). A chaque itération, un nouveau plan de capacité est transmis vers chaque centre hiérarchiquement supérieur. La capacité allouée à chaque itération pour une production demandée par l'un des centres hiérarchiques peut alors se déduire du plan de production élaboré par le partenaire en charge de répartir le travail (maillon commun) :

$$\text{CapR}_r^{n+1,s}(t) = \text{CapR}_r^{n,s'}(t) - \left[ \sum_{s' \in \bar{E}^{n,s'}} \sum_{p \in P_r} \alpha_p f_{r,p}^{n,s'}(t) - \sum_{p \in P_r} \alpha_p f_{r,p}^{n,s'}(t) \right] \quad \forall s \in \widehat{E}^{n,s'}, \forall t \in H \quad (26)$$

Ainsi, cette capacité, telle qu'elle est perçue par un centre hiérarchique ( $CD^{n+1,s}$ ), se déduit de la capacité totale de production dont dispose le centre de décision de niveau  $n$  ( $CD^{n,s'}$ ) à laquelle on soustrait l'ensemble des charges relatives aux travaux déjà planifiés, hormis ceux répondant totalement ou partiellement aux consignes émises par  $CD^{n+1,s}$ . Il est tout particulièrement important de noter que :

- Cette relation n'est pas une nouvelle contrainte du modèle, mais exprime la technique de calcul de la nouvelle capacité que  $CD^{n,s'}$  réserve pour les demandes issues de  $CD^{n+1,s}$ , et ceci pour chaque itération du processus de négociation : elle remplace l'équation (21) concernant le retour d'information vers un centre de décision de niveau supérieur (cf. §3.5.2.2).
- D'une itération à l'autre, la capacité réservée pour  $CD^{n+1,s}$  peut aussi bien augmenter que diminuer, selon la préférence que le  $CD^{n,s'}$  donne à ses « clients » (le « client » est l'entité à l'origine de l'émission des demandes en produits).
- Lorsqu'il existe une capacité résiduelle (capacité disponible sur la ressource après soustraction des charges induites par l'ensemble des travaux planifiés par  $CD^{n,s'}$ ), celle-ci est proposée dans sa totalité à l'ensemble des « clients » et peut engendrer des conflits, dès lors qu'au moins deux d'entre eux souhaitent en bénéficier. Cette capacité résiduelle peut elle-même constituer un objet de négociation.

### 5.3 Cadre de l'expérimentation

La problématique du partage de capacité et de la négociation entre différents partenaires, appliquée au cas d'étude défini dans le chapitre 4, met en scène l'assembleur en tant que maillon commun de deux chaînes (tables, meubles) dans un contexte de pilotage par chaîne (figure 5.2). L'assembleur est simultanément sollicité par les centres de décision pilotant les deux chaînes logistiques et doit négocier avec ceux-ci une solution consensuelle garantissant un bon compromis entre intérêt individuel et profit global.

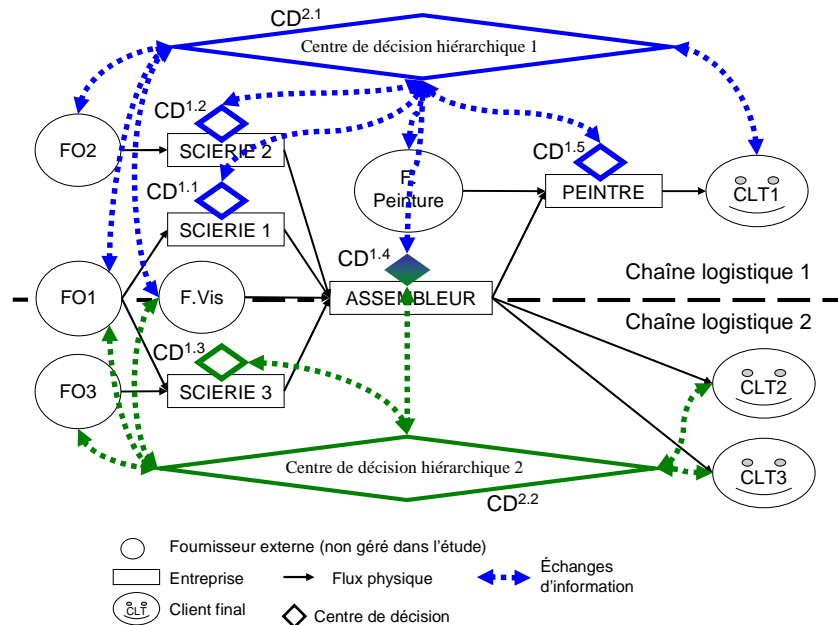


Figure 5.2 : Maillon commun et pilotage par chaîne

La recherche de ce consensus est la raison d'être du processus de négociation qui s'engage entre les centres de décision pilotant les chaînes logistiques (que nous appellerons « centres hiérarchiques »), et le centre de décision local en charge de conduire la production chez l'assembleur.

Les différentes stratégies de négociation vont alors se décliner en fonction de la valuation d'un certain nombre de paramètres.

#### 5.3.1 Facteurs reflétant la stratégie de négociation

Le processus de négociation que nous considérons (§5.2.2) ne se veut pas universel et ne reflète qu'une certaine variété des discussions possibles dans une relation client-fournisseur. L'analyse menée cherche néanmoins à mettre en exergue un certain nombre de questions et de facteurs susceptibles d'influencer les performances des chaînes logistiques à l'issue de la négociation.

*La négociation recherche-t-elle un accord gagnant-gagnant ?*

Le processus étudié n'est pas à proprement parler une recherche d'accord gagnant – gagnant garantissant le partage des gains au niveau des différents partenaires. L'assembleur a en effet un rôle prépondérant dans la recherche de solution consensuelle, compte tenu qu'il est le seul à connaître réellement la capacité de production dont il dispose. Il influe dans ses choix de

répartition de capacité sur les performances de l'ensemble des deux réseaux logistiques auxquels il participe.

Le premier choix porte sur la manière dont l'assembleur partitionne sa capacité de production vis-à-vis des ses clients. Le paramètre  $\mu$  caractérise dans ce cadre la répartition de la capacité totale de l'assembleur censée répondre au mieux aux besoins exprimés par les différents centres hiérarchiques (figure 5.3).

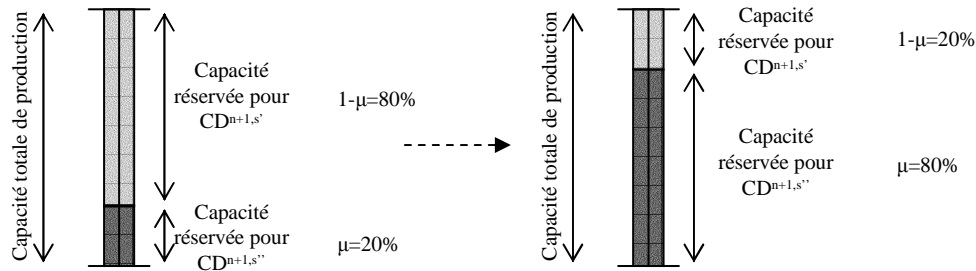


Figure 5.3 : Partitionnement de la capacité de production

La répartition de la capacité peut se faire de manière arbitraire ou selon les volumes de production connus de l'assembleur et résultant des demandes prévisionnelles issues de ces centres hiérarchiques (charges induites par les demandes des clients sur l'horizon de planification), ou encore selon les gains potentiels des ventes sous-jacentes aux demandes prévisionnelles. Le partenaire cherche, dans ce cas, à satisfaire au mieux et sans différenciation l'ensemble de ses clients.

La répartition de capacité peut également manifester de la part de l'assembleur la volonté de stimuler la demande de l'un des centres en lui offrant une capacité supérieure à la demande initialement exprimée. Cette stratégie est généralement induite par la recherche d'un profit maximum local, et traduit la préférence qu'un acteur industriel peut exprimer vis-à-vis de certains de ses clients. En corollaire, cette politique de sur-allocation de capacité peut conduire à la non satisfaction d'un certain nombre de demandes.

L'assembleur peut également rentrer dans un jeu de *sur-booking* en cherchant à offrir la plus grande capacité au mieux disant. Cette situation le conduit à surestimer la capacité qu'il réserve à ses clients, quitte à proposer sur l'ensemble de son offre plus de 100% de sa capacité. L'assembleur, étant ici impliqué dans deux chaînes, est ainsi amené à proposer, à chacun des deux centres hiérarchiques, une capacité pouvant excéder 50% de la capacité totale disponible.

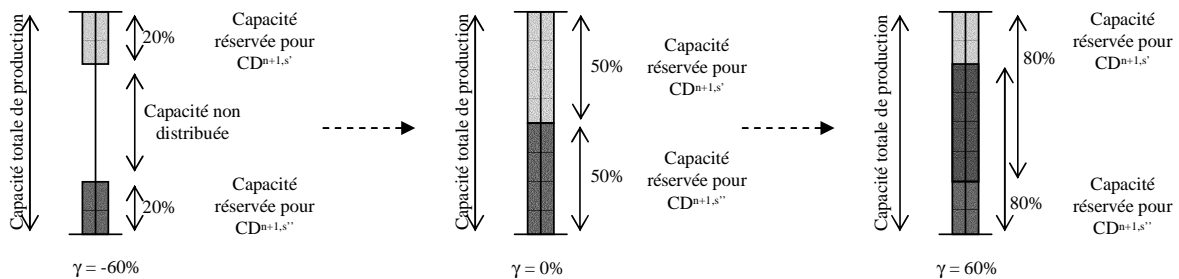


Figure 5.4 : Sous-estimation / surestimation de la capacité de production

Le paramètre  $\gamma$  permet ici d'identifier quantitativement la fraction de capacité que l'assembleur décide :

- de soustraire à sa capacité totale. Le paramètre  $\gamma$  a dans ce cas une valeur négative qui correspond à une hypothèque de capacité envers les clients actuels, afin de pouvoir répondre à de nouvelles sollicitations ou réaliser des opérations de maintenance. Cependant, une valeur négative n'a que peu d'intérêt pour le centre de décision local, qui prend alors le risque de sous-utiliser ses moyens de production.
- de proposer à l'ensemble de ses clients, de façon à stimuler les demandes émanant de ces derniers. Dans un tel cas, la valeur de  $\gamma$  est comprise entre 0 et 100%. Le risque majeur est alors l'apparition de conflits dans l'utilisation des capacités, la difficulté de faire converger le processus de négociation, et le risque de ne pas satisfaire les clients.

La réservation de capacité pour les deux chaînes peut alors s'appliquer à partir d'une répartition initiale équitable de la capacité totale de production de l'assembleur (50% - 50%) ou bien se pratiquer autour du point de partitionnement choisi par l'assembleur. Ainsi, nous pouvons exprimer le calcul de la capacité offerte aux deux centres de décision hiérarchiquement supérieurs par :

$$\text{CapR}_r^{n+1,s'}(t) = \left[ (1 - \mu) + \frac{\gamma}{2} \right] \times \text{CapR}_r^{n,s}(t) \quad \text{et} \quad \text{CapR}_r^{n+1,s''}(t) = \left[ \mu + \frac{\gamma}{2} \right] \times \text{CapR}_r^{n,s}(t) \quad (27)$$

*Le processus de négociation tend-il vers un accord perdant-perdant ?*

Le processus de négociation étudié n'étant pas exécuté dans un environnement totalement concurrentiel et compétitif, il n'est pas certain que le résultat en terme d'accord soit de type perdant-perdant. L'assembleur a en effet l'obligation de satisfaire au mieux les demandes émanant de l'ensemble des centres hiérarchiques. Cette obligation se traduit dans le modèle de planification par l'ajout d'un critère de pénalité, tel qu'il est discuté en §5.2.3. Dans l'expression des pénalités, les paramètres de pondération  $\Phi_P$  et  $\lambda_P$  permettent de pénaliser plus ou moins les changements dans les plans de production et d'approvisionnement, montrant ainsi la volonté de l'assembleur de satisfaire tout ou partie des contraintes de volume à produire, imposées par les centres hiérarchiques.

*Quel est le type d'accord vers lequel on converge ?*

La nature même de l'accord est conditionnée par le paramétrage du modèle. Ainsi, si l'on suppose que les valeurs attribuées au couple de paramètres  $(\Phi_P, \lambda_P)$  sont très largement supérieures à celles caractérisant les coûts techniques, on privilégie chez l'assembleur une recherche de solution tendant à satisfaire l'ensemble des clients, plutôt que d'assurer un profit maximal. Si au contraire  $(\Phi_P, \lambda_P) = (0,0)$ , seul le profit va conduire la négociation et l'assembleur sortira momentanément gagnant de la négociation, alors que les clients n'auront pas toute satisfaction quant aux réponses à leurs sollicitations. Néanmoins, ce type de situation n'est pas sans risque pour l'assembleur, qui peut perdre rapidement la confiance de ses clients. Une mauvaise répartition des capacités vis-à-vis de ces derniers, ajoutée au fait de jouer un peu trop au « poker menteur » (par surestimation des capacités disponibles), peut également conduire à une insatisfaction des clients (qui risquent de subir des retards de livraison).



Notons que, dans la négociation, les centres hiérarchiques sont partiellement soumis aux décisions du centre de décision local, tout au moins quant à la manière de planifier les activités du fait des capacités allouées. En d'autres termes, la fonction coût définissant la stratégie de planification au niveau des réseaux logistiques ne comporte pas de critère de pénalité, la décision étant alors régie par la recherche de profit global maximum, sous contraintes de capacités telles qu'imposées par l'assembleur.

Afin de simuler l'ensemble des cas possibles et de juger de l'impact des choix de l'assembleur sur les performances des chaînes logistiques, un ensemble de scénarios a été élaboré dont chacun est défini par des valeurs différentes des couples de paramètres  $(\mu, \gamma)$  et  $(\Phi_P, \lambda_P)$ .

### 5.3.2 Campagne d'expérimentations

A l'instar de l'analyse réalisée dans le chapitre précédent, nous nous appuyons sur le même jeu de données de références afin de mettre en avant l'influence des stratégies de négociation de partage de ressource (maillon commun) sur les performances des réseaux logistiques. Le scénario de référence ne faisant pas cas de surcharge de production, aucune négociation n'est engagée. Afin de pouvoir estimer l'instant auquel la négociation est engagée, et tester l'influence de la variation des paramètres discutés plus haut, une série d'expérimentations est menée en se basant sur une hausse des demandes de deux produits (cf. figure 5.5), susceptibles de représenter (par exemple) une variation brutale de demande suite à la mise en place de campagnes promotionnelles sur les produits :

- Campagne de promotion sur les meubles simples de la période 31 à la période 35,
- Campagne de promotion sur les tables peintes de la période 36 à la période 40.

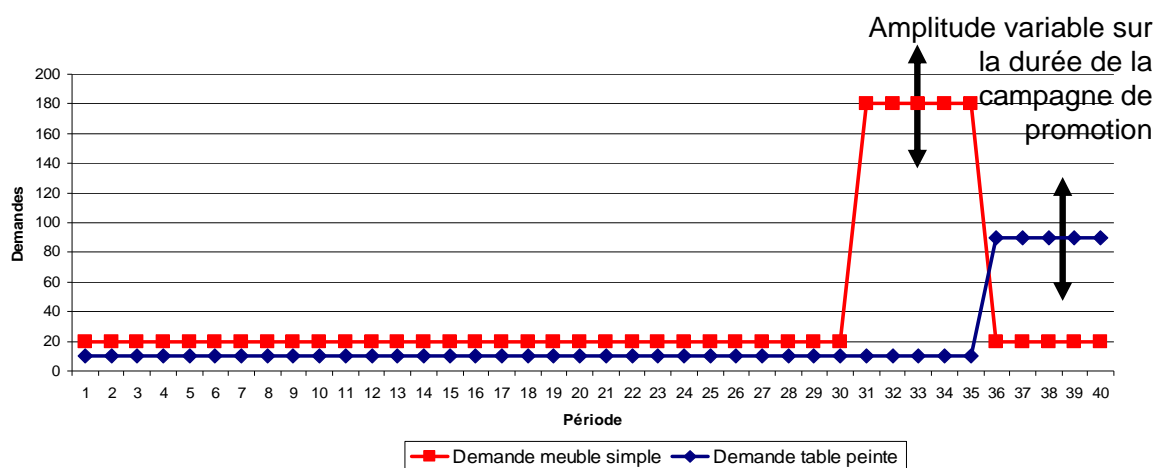


Figure 5.5 : Profil des demandes sur l'horizon (expérimentation E4)

Dans ce contexte, nous nous proposons de faire varier l'amplitude des demandes durant ces périodes, afin de créer des phénomènes de saturation de la capacité sur plusieurs périodes et donc de déclencher des processus de négociation de plus en plus contraints. Le tableau 5.1 fait la synthèse des cas étudiés en précisant, pour chaque scénario, l'amplitude de la variation retenue pour chaque produit.

|        | E1-réf | E2 | E3  | E4  | E5  | E6  | E7  | E8  | E9  | E10 | E11 |
|--------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tables | 10     | 20 | 50  | 90  | 100 | 110 | 130 | 160 | 210 | 310 | 410 |
| MS     | 20     | 40 | 100 | 180 | 200 | 220 | 260 | 320 | 420 | 620 | 820 |
| MG     | 10     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Tableau 5.1 : Série d'expérimentations : variation de la demande pendant la campagne

Il est intéressant de noter que le positionnement dans le temps de la variation de la demande en tables peintes engendre une augmentation de la charge de travail chez l'assembleur sur les périodes 31 à 35 (décalage dû aux délais de production chez le peintre et aux délais de transport). Au cumul des demandes, l'assembleur se retrouve durant ces périodes dans une situation où sa capacité est bien inférieure aux demandes de ses « clients ». L'assembleur est alors à l'origine du processus de négociation visant à répartir sa capacité de production entre les deux chaînes.

### 5.3.3 Mesure de la performance

Pour chaque scénario étudié, les performances de chacune des chaînes logistiques sont mesurées (choix des indicateurs de performances) en mettant en avant les coûts techniques (coûts achat, production, stockage et rupture) auxquels devrait en principe s'ajouter le coût de pénalité traduisant le non respect des consignes transmises par les centres hiérarchiques. Cependant, ce coût est systématiquement nul lorsque la négociation se termine ; la nature même du processus de négociation tend en effet, à chaque itération, à faire converger les décisions des centres hiérarchiques et de l'assembleur vers des plans identiques, annulant en cela les coûts de pénalité. Néanmoins, il est possible de quantifier ces pénalités en considérant l'écart de performances (quantité de produits livrés et fabriqués,...) entre la situation de début de négociation (en considérant que les demandes initialement transmises par les centres hiérarchiques sont satisfaites) et la situation de fin de négociation (si convergence il y a dans le processus).

Compte tenu du nombre de simulations réalisées (environ 350 simulations), et afin d'extraire les informations pertinentes exprimant les grandes tendances de variation de performances, nous choisissons de présenter les résultats issus des séries d'expérimentations (application des scénarios E1 à E11) sous la forme de moyennes pour chaque indicateur de performances choisi (tableau 5.2).

Notons également que les résultats relatés dans la suite de ce chapitre présenteront les performances pour les trois architectures de pilotage étudiées au chapitre 4. Seuls les résultats concernant le pilotage « par chaîne » sont significatifs dans l'étude que nous menons du processus de négociation. Les performances des deux autres architectures de pilotage ne sont décrites que pour situer l'efficacité du pilotage par chaînes vis-à-vis de ces derniers. Ils traduisent de plus deux philosophies opposées de gestion. La comparaison des performances est à ce titre intéressante. Pour le pilotage centralisé, la capacité de l'assembleur résulte de la recherche d'un profit maximum au périmètre de l'ensemble des partenaires. Le pilotage distribué conduit à une utilisation de la capacité optimisant le profit local de l'assembleur.



| Processus de convergence | Φp | Ap Table | Ap Meuble | Partitionnement (μ) | Chevauchement (γ) | Pilotages    |            |            | Valeur moyenne |            |            | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | Différence avec centralisé |           |
|--------------------------|----|----------|-----------|---------------------|-------------------|--------------|------------|------------|----------------|------------|------------|--|------------|-----------|----------------------------|-----------|
|                          |    |          |           |                     |                   | Performance  | Centralisé |            | Centralisé     | Par chaîne |            | Centralisé                             | Par chaîne |           | Par chaîne                 | Distribué |
|                          |    |          |           |                     |                   |              | Par chaîne | Distribué  |                | Par chaîne | Distribué  |  |            |           |                            |           |
| Aucun                    | 1  | 1        | 1         | 20                  | 0                 | Vente        | 1206624,00 | 1128374,01 | 1193628,94     | 484164,00  | 405914,01  | 471168,94                              | -78249,99  | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 514210,56  | 570120,85      | 227058,00  | 196250,56  | 252160,85                              | -30807,44  | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 40738,10   | 44781,69       | 18307,50   | 15388,10   | 19431,69                               | -2919,40   | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 43622,00   | 41855,62       | 34114,13   | 43622,00   | 41855,62                               | 9507,86    | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 8590,93    | 20628,72       | 9881,30    | 8590,93    | 20628,72                               | -1290,37   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 521212,41  | 508195,90      | 191356,27  | 146852,41  | 133835,90                              | -44503,86  | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 7435,60    | 7117,17        | 5920,33    | 7435,60    | 7117,17                                | 1515,27    | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 6312,94    | 162601,03      | 7443,50    | 6312,94    | 162601,03                              | -1130,56   | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1172702,03 | 1193628,94     | 484164,00  | 450242,03  | 471168,94                              | -33921,97  | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 539158,61  | 570120,85      | 227058,00  | 221198,61  | 252160,85                              | -5859,39   | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 42271,51   | 44781,69       | 18307,50   | 16921,51   | 19431,69                               | -1385,99   | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 38483,46   | 41855,62       | 34114,13   | 38483,46   | 41855,62                               | 4369,33    | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9598,93    | 20628,72       | 9881,30    | 9598,93    | 20628,72                               | -282,37    | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 543189,52  | 508195,90      | 191356,27  | 168829,52  | 133835,90                              | -22526,75  | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 6563,13    | 7117,17        | 5920,33    | 6563,13    | 7117,17                                | 642,80     | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 6984,27    | 162601,03      | 7443,50    | 6984,27    | 162601,03                              | -459,23    | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1090547,39 | 1193628,94     | 484164,00  | 368087,39  | 471168,94                              | -116076,61 | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 504637,98  | 570120,85      | 227058,00  | 186677,98  | 252160,85                              | -40380,02  | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 38925,11   | 44781,69       | 18307,50   | 13575,11   | 19431,69                               | -4732,39   | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 47902,66   | 41855,62       | 34114,13   | 47902,66   | 41855,62                               | 13788,53   | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 7914,46    | 20628,72       | 9881,30    | 7914,46    | 20628,72                               | -1966,84   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 491167,17  | 508195,90      | 191356,27  | 116807,17  | 133835,90                              | -74549,10  | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 8019,09    | 7117,17        | 5920,33    | 8019,09    | 7117,17                                | 2098,75    | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 5986,36    | 162601,03      | 7443,50    | 5986,36    | 162601,03                              | -1457,14   | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 989307,38  | 1193628,94     | 484164,00  | 266847,38  | 471168,94                              | -217316,62 | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 462279,60  | 570120,85      | 227058,00  | 144319,60  | 252160,85                              | -82738,40  | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 34814,56   | 44781,69       | 18307,50   | 9464,56    | 19431,69                               | -8842,94   | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 59650,13   | 41855,62       | 34114,13   | 59650,13   | 41855,62                               | 25539,99   | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 5547,40    | 20628,72       | 9881,30    | 5547,40    | 20628,72                               | -4333,90   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 427015,69  | 508195,90      | 191356,27  | 52655,69   | 133835,90                              | -138700,57 | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 9874,20    | 7117,17        | 5920,33    | 9874,20    | 7117,17                                | 3953,87    | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 4476,42    | 162601,03      | 7443,50    | 4476,42    | 162601,03                              | -2967,08   | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 875602,05  | 1193628,94     | 484164,00  | 153142,05  | 471168,94                              | -331021,95 | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 414516,31  | 570120,85      | 227058,00  | 96556,31   | 252160,85                              | -130501,69 | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 30200,29   | 44781,69       | 18307,50   | 4850,29    | 19431,69                               | -13457,21  | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 73325,33   | 41855,62       | 34114,13   | 73325,33   | 41855,62                               | 39211,19   | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 2703,09    | 20628,72       | 9881,30    | 2703,09    | 20628,72                               | -7178,21   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 354857,04  | 508195,90      | 191356,27  | -19502,96  | 133835,90                              | -210859,23 | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 12068,82   | 7117,17        | 5920,33    | 12068,82   | 7117,17                                | 6148,49    | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 2669,19    | 162601,03      | 7443,50    | 2669,19    | 162601,03                              | -4774,31   | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 733982,05  | 1193628,94     | 484164,00  | 11522,05   | 471168,94                              | -472641,95 | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 355958,86  | 570120,85      | 227058,00  | 37998,86   | 252160,85                              | -189059,14 | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 24413,40   | 44781,69       | 18307,50   | -936,60    | 19431,69                               | -19244,10  | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 103391,18  | 41855,62       | 34114,13   | 103391,18  | 41855,62                               | 69277,04   | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 2818,58    | 20628,72       | 9881,30    | 2818,58    | 20628,72                               | -7062,72   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 247400,03  | 508195,90      | 191356,27  | -126959,97 | 133835,90                              | -318316,23 | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 16187,00   | 7117,17        | 5920,33    | 16187,00   | 7117,17                                | 10266,66   | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 7379,31    | 162601,03      | 7443,50    | 7379,31    | 162601,03                              | -64,19     | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 594654,00  | 1193628,94     | 484164,00  | -137806,00 | 471168,94                              | -621970,00 | -12995,06 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 296443,20  | 570120,85      | 227058,00  | -21516,80  | 252160,85                              | -248574,80 | 25102,85  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 18306,00   | 44781,69       | 18307,50   | -7044,00   | 19431,69                               | -25351,50  | 1124,19   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 140225,20  | 41855,62       | 34114,13   | 140225,20  | 41855,62                               | 106111,07  | 7741,49   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 6429,90    | 20628,72       | 9881,30    | 6429,90    | 20628,72                               | -3451,40   | 10747,42  |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 123249,70  | 508195,90      | 191356,27  | -251110,30 | 133835,90                              | -442466,57 | -57520,37 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 21153,00   | 7117,17        | 5920,33    | 21153,00   | 7117,17                                | 15232,67   | 1196,84   |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 21567,00   | 162601,03      | 7443,50    | 21567,00   | 162601,03                              | 14123,50   | 155157,53 |                            |           |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,00       |                |            |            |  |            |           |                            |           |

| Processus de convergence | Φp | Ap Table | Ap Meuble | Partitionnement (μ) | Chevauchement (γ) | Pilotes      |            |            | Valeur moyenne |   |           | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | Différence avec centralisé |  |           |  |
|--------------------------|----|----------|-----------|---------------------|-------------------|--------------|------------|------------|----------------|---|-----------|--|------------|-----------|----------------------------|--|-----------|--|
|                          |    |          |           |                     |                   | Performance  | Centralisé |            | Par chaîne     |   | Distribué |  | Centralisé |           | Par chaîne                 |  | Distribué |  |
|                          |    |          |           |                     |                   |              |            |            |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
| Aucun                    | 0  | 1        | 1         | 50                  | 100               | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00   | 484164,00 | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00   | 235294,80 | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50  | 18307,50  | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Rupture | 34114,13   | 34215,13   | 41855,62       | 34114,13  | 34215,13  | 41855,62                               | 101,00     | 7741,49   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Cout Stock   | 9881,30    | 9872,73    | 20628,72       | 9881,30   | 9872,73   | 20628,72                               | -8,57      | 10747,42  |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Profit       | 565716,27  | 565623,84  | 508195,90      | 191356,27   | 191263,84 | 133835,90                              | -92,43     | -57520,37 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Rupture      | 5920,33    | 5934,37    | 7117,17        | 5920,33   | 5934,37   | 7117,17                                | 14,03      | 1196,84   |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Stock        | 7443,50    | 8308,30    | 162601,03      | 7443,50   | 8308,30   | 162601,03                              | 864,80     | 155157,53 |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | Nbre Echange |            | 1,90       |                |   |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | 0,01         | 0,1        | 50         | 100            | Pas de convergence dans la négociation à partir de demande > ou égale à 800MS |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | 1            | 0,1        | 50         | 100            | Pas de convergence dans la négociation à partir de demande > ou égale à 800MS |           |  |            |           |                            |  |           |  |
|                          |    |          |           |                     |                   | 0,1          | 0,01       | 50         | 100            | Pas de convergence dans la négociation à partir de demande > ou égale à 400MS |           |  |            |           |                            |  |           |  |

| Processus de convergence                           | $\Phi_p$   | $\lambda_p$ Table | $\lambda_p$ Meuble | Partitionnement ( $\mu$ )                 | Chevauchement ( $\gamma$ ) | Pilotages    |            |            | Valeur moyenne |            |            | Ecart moyen avec scénario de référence |            |           | Différence avec centralisé |  |
|--|--|-------------------|--------------------|---|----------------------------|--------------|------------|------------|----------------|------------|------------|--|------------|-----------|----------------------------|--|
|  |  |                   |                    |   |                            | Performance  | Centralisé | Par chaîne | Distribué      | Centralisé | Par chaîne | Distribué                              | Par chaîne | Distribué |                            |  |
| Doublage $\lambda_p$                               | 0  | 1                 | 0,1                | Variable en fonction des demandes clients | 10                         | Vente        | 1206624,00 | 1206624,00 | 1193628,94     | 484164,00  | 484164,00  | 471168,94                              | 0,00       | -12995,06 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Achat   | 545018,00  | 553254,80  | 570120,85      | 227058,00  | 235294,80  | 252160,85                              | 8236,80    | 25102,85  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Prod    | 43657,50   | 43657,50   | 44781,69       | 18307,50   | 18307,50   | 19431,69                               | 0,00       | 1124,19   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Rupture | 34114,13   | 34182,31   | 41855,62       | 34114,13   | 34182,31   | 41855,62                               | 68,18      | 7741,49   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Stock   | 9881,30    | 9959,29    | 20628,72       | 9881,30    | 9959,29    | 20628,72                               | 77,99      | 10747,42  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Profit       | 565716,27  | 565570,10  | 508195,90      | 191356,27  | 191210,10  | 133835,90                              | -146,16    | -57520,37 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Rupture      | 5920,33    | 5932,71    | 7117,17        | 5920,33    | 5932,71    | 7117,17                                | 12,37      | 1196,84   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Stock        | 7443,50    | 8171,29    | 162601,03      | 7443,50    | 8171,29    | 162601,03                              | 727,79     | 155157,53 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Nbre Echange |            | 3,40       |                |            |            |  |            |           |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Vente        | 1206624,00 | 1204985,92 | 1193628,94     | 484164,00  | 482525,92  | 471168,94                              | -1638,08   | -12995,06 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Achat   | 545018,00  | 551987,26  | 570120,85      | 227058,00  | 234027,26  | 252160,85                              | 6969,26    | 25102,85  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Prod    | 43657,50   | 43614,58   | 44781,69       | 18307,50   | 18264,58   | 19431,69                               | -42,92     | 1124,19   |                            |  |
|  | Cout Rupture   | 34114,13          | 34182,64           | 41855,62                                  | 34114,13                   | 34182,64     | 41855,62   | 68,51      | 7741,49        |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Cout Stock   | 9881,30           | 10054,95           | 20628,72                                  | 9881,30                    | 10054,95     | 20628,72   | 173,65     | 10747,42       |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Profit   | 565716,27         | 565146,49          | 508195,90                                 | 191356,27                  | 190786,49    | 133835,90  | -569,77    | -57520,37      |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Rupture  | 5920,33           | 5936,69            | 7117,17                                   | 5920,33                    | 5936,69      | 7117,17    | 16,36      | 1196,84        |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Stock  | 7443,50           | 7050,74            | 162601,03                                 | 7443,50                    | 7050,74      | 162601,03  | -392,76    | 155157,53      |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Nbre Echange   |                   | 3,60               |   |                            |              |            |            |                |            |            |  |            |           |                            |  |
|  | Variable en fonction de la charge des demandes clients | 0                 | 1                  | 0,1                                       | 10                         | Vente        | 1206624,00 | 1206395,00 | 1193628,94     | 484164,00  | 483935,00  | 471168,94                              | -229,00    | -12995,06 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Achat   | 545018,00  | 553098,47  | 570120,85      | 227058,00  | 235138,47  | 252160,85                              | 8080,47    | 25102,85  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Prod    | 43657,50   | 43651,50   | 44781,69       | 18307,50   | 18301,50   | 19431,69                               | -6,00      | 1124,19   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Rupture | 34114,13   | 34453,77   | 41855,62       | 34114,13   | 34453,77   | 41855,62                               | 339,64     | 7741,49   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Stock   | 9881,30    | 10058,38   | 20628,72       | 9881,30    | 10058,38   | 20628,72                               | 177,08     | 10747,42  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Profit       | 565716,27  | 565132,88  | 508195,90      | 191356,27  | 190772,88  | 133835,90                              | -583,39    | -57520,37 |                            |  |
| Rupture  |  |                   |                    |   |                            | 5920,33      | 5976,37    | 7117,17    | 5920,33        | 5976,37    | 7117,17    | 56,04                                  | 1196,84    |           |                            |  |
| Stock  |  |                   |                    |   |                            | 7443,50      | 11527,70   | 162601,03  | 7443,50        | 11527,70   | 162601,03  | 4084,20                                | 155157,53  |           |                            |  |
| Nbre Echange                                       |  |                   |                    |   |                            |              | 3,20       |            |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Vente  |  |                   |                    |   |                            | 1206624,00   | 1206624,00 | 1193628,94 | 484164,00      | 484164,00  | 471168,94  | 0,00                                   | -12995,06  |           |                            |  |
| Cout Achat   |  |                   |                    |   |                            | 545018,00    | 553254,80  | 570120,85  | 227058,00      | 235294,80  | 252160,85  | 8236,80                                | 25102,85   |           |                            |  |
| Cout Prod  |  |                   |                    |   |                            | 43657,50     | 43657,50   | 44781,69   | 18307,50       | 18307,50   | 19431,69   | 0,00                                   | 1124,19    |           |                            |  |
| Cout Rupture                                       | 34114,13   | 34419,84          | 41855,62           | 34114,13                                  | 34419,84                   | 41855,62     | 305,71     | 7741,49    |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Cout Stock   | 9881,30  | 10024,37          | 20628,72           | 9881,30                                   | 10024,37                   | 20628,72     | 143,07     | 10747,42   |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Profit   | 565716,27  | 565267,48         | 508195,90          | 191356,27                                 | 190907,48                  | 133835,90    | -448,79    | -57520,37  |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Rupture  | 5920,33  | 5971,23           | 7117,17            | 5920,33                                   | 5971,23                    | 7117,17      | 50,90      | 1196,84    |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Stock  | 7443,50  | 10261,35          | 162601,03          | 7443,50                                   | 10261,35                   | 162601,03    | 2817,85    | 155157,53  |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Nbre Echange                                       |  | 3,30              |                    |   |                            |              |            |            |                |            |            |  |            |           |                            |  |
| Capacité disponible de moins en moins redistribuée | 0  | 1                 | 0,1                | Variable en fonction des demandes clients | 10                         | Vente        | 1206624,00 | 1194971,19 | 1193628,94     | 484164,00  | 472511,19  | 471168,94                              | -11652,81  | -12995,06 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Achat   | 545018,00  | 544121,80  | 570120,85      | 227058,00  | 226161,80  | 252160,85                              | -896,20    | 25102,85  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Prod    | 43657,50   | 43352,76   | 44781,69       | 18307,50   | 18002,76   | 19431,69                               | -304,74    | 1124,19   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Rupture | 34114,13   | 35244,39   | 41855,62       | 34114,13   | 35244,39   | 41855,62                               | 1130,26    | 7741,49   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Cout Stock   | 9881,30    | 10975,53   | 20628,72       | 9881,30    | 10975,53   | 20628,72                               | 1094,23    | 10747,42  |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Profit       | 565716,27  | 561276,72  | 508195,90      | 191356,27  | 186916,72  | 133835,90                              | -4439,55   | -57520,37 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Rupture      | 5920,33    | 6122,20    | 7117,17        | 5920,33    | 6122,20    | 7117,17                                | 201,87     | 1196,84   |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Stock        | 7443,50    | 28107,52   | 162601,03      | 7443,50    | 28107,52   | 162601,03                              | 20664,02   | 155157,53 |                            |  |
|  |  |                   |                    |   |                            | Nbre Echange |            | 10,60      |                |            |            |  |            |           |                            |  |

Tableau 5.2 : Résultats des expérimentations avec négociation

### 5.4 Analyse des résultats d'expérimentations

Afin d'analyser et de comprendre l'impact des différents paramètres dédiés au processus de négociation, les expérimentations sont organisées sous forme de campagnes de simulation autour :

- 1) de la variation du paramètre  $\mu$  pour tester l'influence de la répartition initiale de la capacité,
- 2) de la variation du paramètre  $\gamma$  pour un partage de type « poker menteur »,
- 3) de la variation du paramètre  $\Phi_p$  dans le critère du maillon commun,
- 4) de la variation du paramètre  $\lambda_p$  dans le critère en fonction des produits approvisionnés.

#### 5.4.1 Influence de la répartition initiale de la capacité

La première étude s'intéresse à l'influence du paramètre  $\mu$  sur la qualité de la solution de planification. Pour cela, nous choisissons de faire varier la valeur de ce paramètre entre 20 et 80% en figeant la valeur des autres éléments ( $\Phi_p = \lambda_p = 1$ , et  $\gamma = 0\%$ ).

Pour cet ensemble de scénarios, la stratégie de planification de l'assembleur consiste à partager la totalité de sa capacité entre les différents clients. Aucune négociation n'est entreprise, du fait que l'assembleur impose, d'une part, cette répartition et, d'autre part, ne surestime pas la capacité partielle allouée à chaque client ( $\gamma = 0$ ). Il informe ainsi les centres hiérarchiques de l'exacte capacité qu'il leur réserve, et ces derniers réalisent la planification des activités en tenant compte de cette contrainte de capacité. L'évolution du profit en

fonction du paramètre  $\mu$  est donnée sur la figure 5.6. La figure 5.7 montre, au centre, les coûts (performances) moyens sur l'ensemble des simulations pour les trois pilotages et, sur l'extérieur, le détail de ces performances en fonction de l'évolution du paramètre  $\mu$  (identifié sur les courbes par les valeurs de la répartition  $\mu - (100-\mu)$ ).

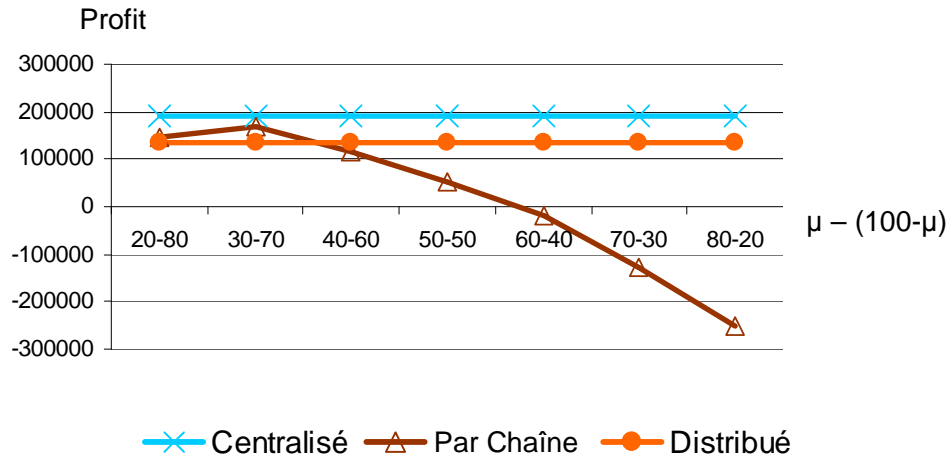


Figure 5.6 : Profit moyen en fonction de la variation du paramètre  $\mu$

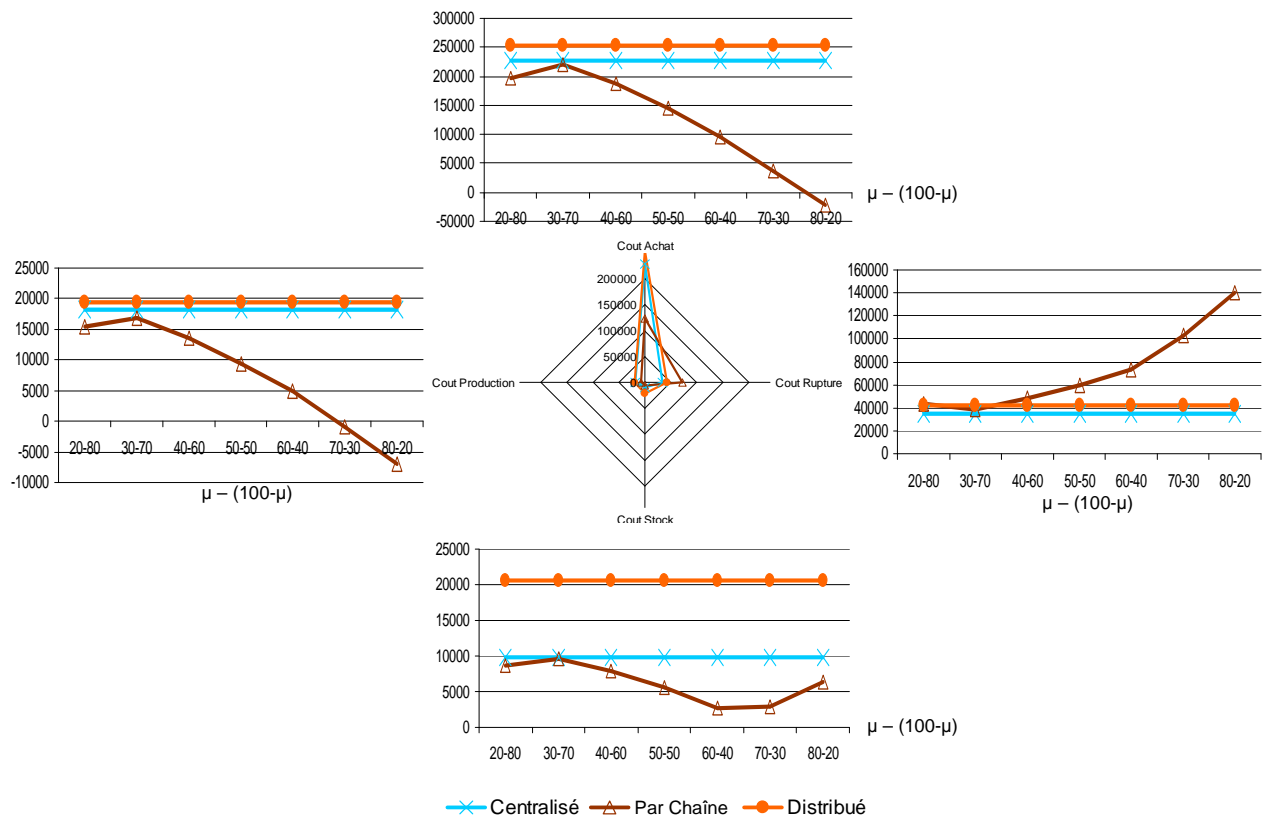


Figure 5.7 : Coûts moyens en fonction de la variation du paramètre  $\mu$

Le profit optimal pour le réseau est obtenu pour un partage initial de la capacité de 30% pour la chaîne de fabrication de tables et 70% pour la chaîne de fabrication de meubles. Ce résultat s'explique par une réservation en rapport avec les volumes de production induits par chaque chaîne : la demande initiale pour le scénario de référence fait notamment état de 10 tables à réaliser pour 30 meubles. Dans ces conditions, le pilotage par chaîne est plus performant que le pilotage distribué et se rapproche du pilotage centralisé en terme de profit.

Si l'on s'éloigne de ce point de fonctionnement, les performances du pilotage par chaîne s'effondrent rapidement et deviennent médiocres. Ce phénomène correspond à l'absence de conflit dans le partage de capacité, puisque chaque centre hiérarchique planifie les activités de l'assembleur en fonction de la capacité que ce dernier lui a réservée (pas de surcharge sur une ou plusieurs période(s) pour le maillon commun à l'issue de la planification). De fait, les centres hiérarchiques, ne contestant pas l'offre de capacité de l'assembleur, travaillent sur la base de répartitions non adaptées à la demande des clients finaux des chaînes, sont obligés de lisser fortement la production (conduisant à l'apparition de stocks) et voient leurs performances fortement dégradées lors de l'apparition de ruptures. Le lissage ne suffit en effet plus à absorber les surcharges ; il provoque de plus des transferts de charge chez les fournisseurs qui ne peuvent anticiper les variations de demandes et livrent alors en retard.

L'évaluation du paramètre  $\mu$  joue donc un rôle très important sur les performances du pilotage par chaîne. Le point de répartition devrait être choisi en adéquation avec les volumes de production induits par les demandes clients sur les deux chaînes logistiques. Ces demandes variant d'une période à l'autre, il serait souhaitable d'avoir une répartition dynamique dans le temps, i.e. une proposition de répartition de capacité en fonction de la période.

#### **5.4.2 Influence de la sur-réservation / sous-réservation de la capacité**

Le processus de négociation étant déclenché par l'apparition de conflits dans le partage de capacité de l'assembleur, nous allons faire apparaître artificiellement ces derniers en faisant varier la valeur du paramètre  $\gamma$ . Nous ne considérons pas dans ce paragraphe des valeurs négatives pour  $\gamma$ , partant du principe que l'assembleur tend à rationaliser l'utilisation de sa capacité (pas de sous-estimation de capacité) et propose donc la totalité de sa capacité de production en réponse aux sollicitations de ses « clients ». La valeur du paramètre  $\gamma$  évolue entre 0 et 100%, traduisant le passage graduel d'une situation sans conflit à une situation où chaque client est susceptible de requérir la totalité de la capacité.

Les expérimentations sont réalisées sur la base d'un pré-partage équitable de la capacité entre les deux chaînes logistiques ( $\mu = 0,5$ ). Ce choix caractérise notre volonté de débiter la négociation à partir d'une répartition de capacité conduisant à des résultats de planification relativement médiocres, sans être pour autant trop éloignés des performances constatées à partir de l'implantation des pilotages distribué et centralisé. Nous souhaitons ainsi constater le gain de performances que l'on peut obtenir à partir d'une négociation engagée du fait d'une surestimation de la capacité, et vérifier si cette négociation permet d'offrir, sous certaines conditions, des performances comparables à celles du pilotage le plus efficace. Les autres paramètres sont fixés à :  $\Phi_p = \lambda_p = 1$ .

A l'image de l'analyse réalisée dans le paragraphe précédent, les figures 5.8 et 5.9 synthétisent les performances sous la forme de valeurs moyennes et mettent en exergue, pour chaque indicateur, la mesure de performance en fonction de l'évolution de la valeur du paramètre étudié.



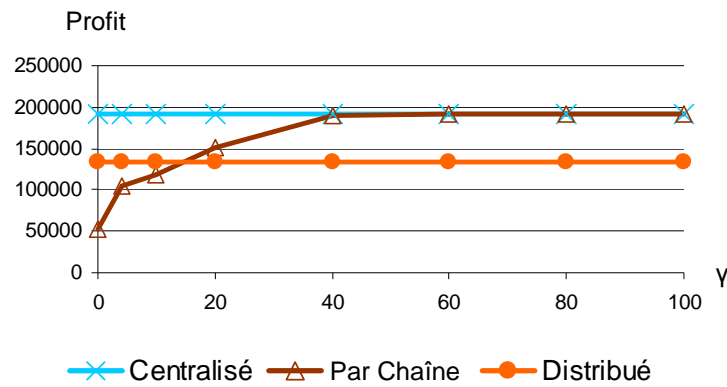


Figure 5.8 : Profit moyens en fonction de la variation du paramètre  $\gamma$

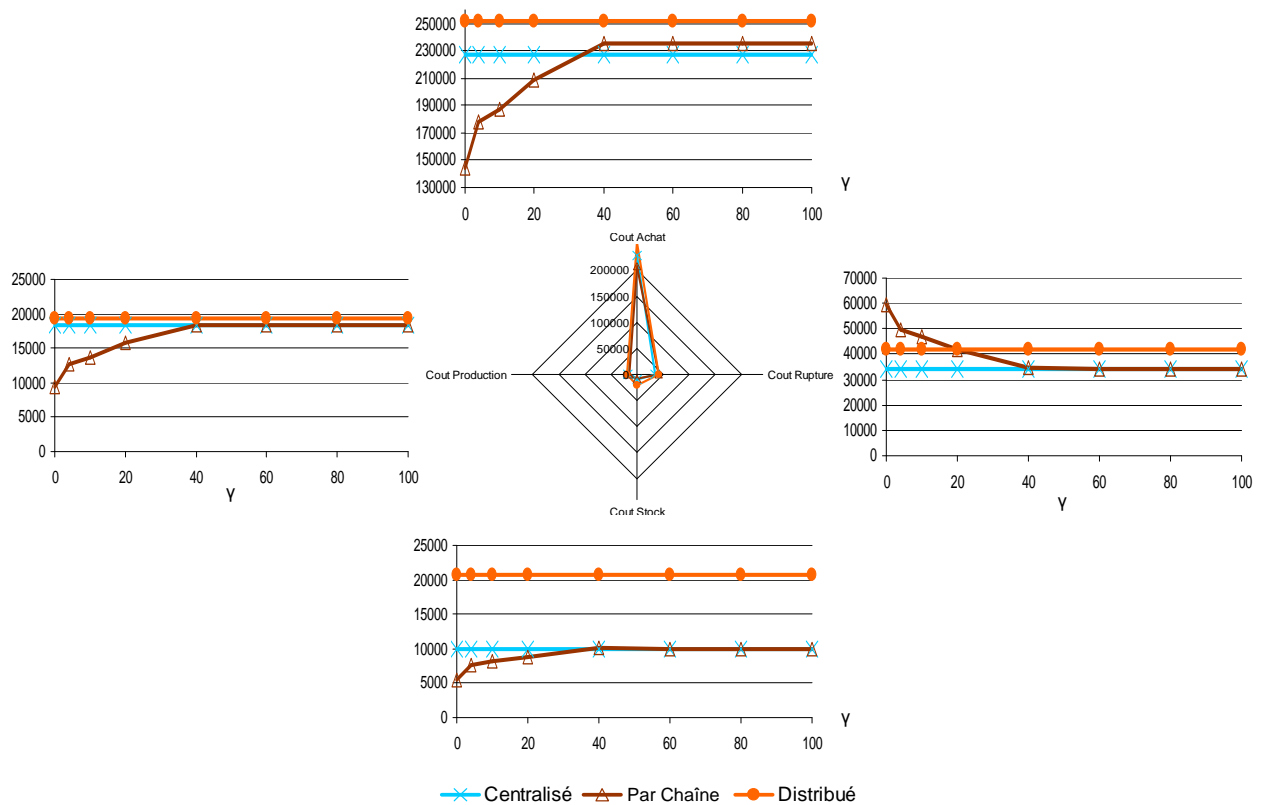


Figure 5.9 : Coûts moyens en fonction de la variation du paramètre  $\gamma$

Durant le processus de négociation, un autre facteur nous semble important à considérer, car il reflète l'effort des acteurs dans la recherche d'une solution consensuelle. Ce facteur est le nombre d'échanges moyen entre le centre de décision local et ses centres hiérarchiques (figure 5.10), qui caractérise la rapidité avec laquelle on converge vers une solution de planification.

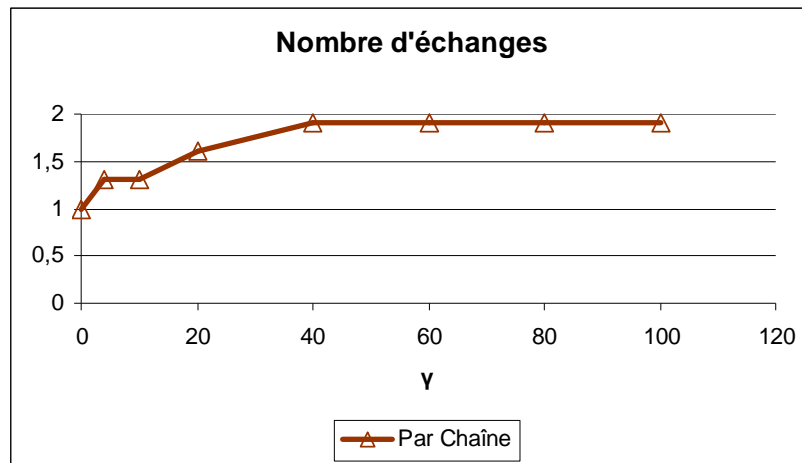


Figure 5.10 : Nombre d'échanges moyen en fonction de la variation du paramètre  $\gamma$  ( $\Phi_P = 1$ )

La valeur  $\gamma = 0$  correspond à une situation de planification ne nécessitant pas de négociation, du fait de l'absence de conflits ; les centres hiérarchiques considèrent la proposition de pré-partage de la capacité de l'assembleur comme une contrainte « dominante » non négociable. Une seule transmission des plans du centre de décision local vers les centres hiérarchiques suffit à trouver une solution faisable. Lorsque la capacité proposée par l'assembleur aux centres hiérarchiques est surestimée, les conflits sont d'autant plus contraints dans leur résolution que la valeur de  $\gamma$  est importante. Le processus dans ce contexte converge vers une solution consensuelle de planification en plus d'une itération.

Nous pouvons alors constater :

- que, lorsque la sur-réserve de la capacité de production allouée à chaque client est de l'ordre de 20% de la capacité totale ( $\gamma = 0,4$ ), les performances du pilotage par chaîne sont équivalentes à celles du pilotage centralisé. Néanmoins, le processus de négociation nécessite en moyenne un peu moins de 2 itérations pour converger vers la solution satisfaisant l'ensemble des parties.
- que pour une valeur  $\gamma$  supérieure à 0,4, aucun gain de performance n'est obtenu, le processus de négociation convergeant systématiquement vers la solution obtenue dans le cas  $\gamma = 0,4$  et dans un nombre d'itérations identiques.

Les constats ainsi faits n'ont évidemment de signification que vis-à-vis de la situation initiale considérée dans la répartition de la capacité, et du jeu de données choisi (scénario). Néanmoins, nous pouvons conclure sur la possibilité d'améliorer nettement les performances d'un pilotage par chaîne lorsqu'un partenaire commun à plusieurs réseaux logistiques surestime volontairement la capacité qu'il pré-réserve à chacun de ses « clients ». Ceci se fait cependant au détriment du nombre d'itérations nécessaires à la convergence des partenaires vers une solution consensuelle ; une mauvaise pré-répartition de la capacité est compensée par la négociation autour d'une utilisation optimale de cette capacité. Pourtant, il est intéressant de noter que l'assembleur n'a aucun intérêt à trop surestimer la capacité qu'il alloue à une production, au risque de diminuer le niveau de confiance que son client a envers lui, sans pour autant gagner en profit individuel.

### 5.4.3 Respect des plans de production

Le faible nombre d'itérations du processus de négociation, tel qu'il est constaté dans le cas précédent, nous laisse penser que les coûts ( $\Phi_P$ ,  $\lambda_P$ ) de la fonction « objectif » du modèle de planification, relatifs au non respect des consignes issues des centres hiérarchiquement supérieurs, prévalent rapidement sur les coûts techniques. Pour réduire ce phénomène, nous nous proposons de réduire les valeurs des coefficients  $\Phi_P$  et  $\lambda_P$ , afin de laisser de l'autonomie au maillon commun dans sa recherche de profit maximal.

Nous nous proposons dans cette logique d'annuler la valeur du paramètre  $\Phi_P$ , considérant ainsi qu'il est prioritaire de maîtriser les flux d'approvisionnement (et implicitement les flux de matières en livraison). Il n'est alors pas indispensable de maîtriser entièrement la production de l'assembleur, puisque celle-ci est directement contrainte par les flux entrants et sortants. Cette mise à zéro de  $\Phi_P$  ne semble ainsi pas incohérente avec la politique des centres hiérarchiques, et permet de laisser plus d'autonomie au maillon commun.

Notons de plus que, malgré l'indexation du paramètre  $\Phi$  par  $p$  montrant que le décideur en charge de la planification peut donner plus ou moins d'importance aux plans de production des différents produits, la mise à zéro des valeurs se fait sur l'ensemble des  $\Phi_P$ .

Les simulations entreprises se basent sur celles du paragraphe précédent ( $0\% \leq \gamma \leq 100\%$ ), mais avec  $\Phi_P = 0$  ( $\lambda_P$  reste à 1, et  $\mu$  à 50%). Nous pouvons alors constater que les résultats obtenus sont totalement identiques, exception faite pour  $\gamma = 20\%$ . Dans ce cas précis, le nombre d'échanges moyen est en effet réduit (cf. figures 5.10 et 5.11) : il passe de 1,6 avec  $\Phi_P = 1$  à 1,3 avec  $\Phi_P = 0$ .

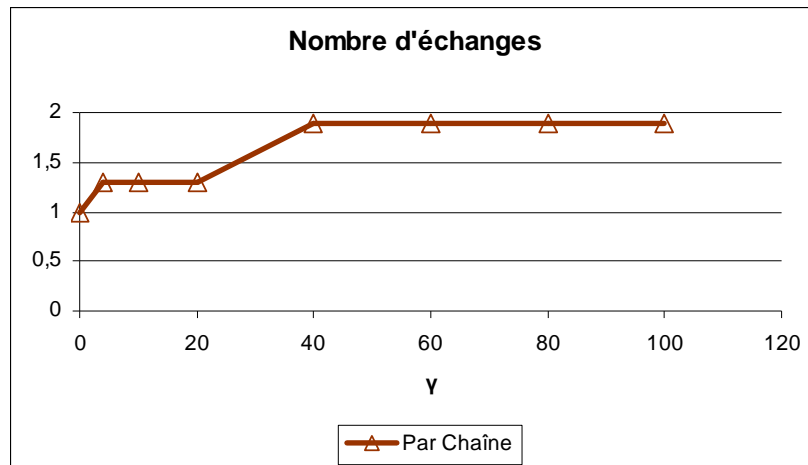


Figure 5.11 : Nombre d'échanges moyen en fonction de la variation du paramètre  $\gamma$  ( $\Phi_P = 0$ )

Si la solution est plus rapidement calculée, elle est cependant de moins bonne qualité : le profit (ou plutôt l'écart de profit avec le scénario de référence) devient légèrement plus faible que celui du pilotage distribué (129 676 UM contre 190 428 UM lorsque  $\Phi_P = 0$ ).

Ainsi, nous concluons sur le fait que le paramètre  $\Phi_P$  n'influe que très rarement sur la qualité de la solution et sur le temps d'obtention de cette dernière. Dans la suite des simulations, nous choisissons alors de laisser ce paramètre à zéro.

#### 5.4.4 Respect des plans d'approvisionnement

Dans la continuité de l'analyse débutée dans le paragraphe précédent, nous nous proposons de réduire progressivement le paramètre  $\lambda_p$ . La valeur de ce paramètre peut être fonction du produit ( $\lambda$  indexé par  $p$ ), montrant une fois de plus la préférence du décideur en charge de la planification quant au respect de tel ou tel plan d'approvisionnement.

Nous choisissons alors, dans le cadre de cette expérimentation, de distinguer les chaînes logistiques en différenciant les valeurs du coefficient en fonction des produits réceptionnés chez l'assembleur, à savoir les pieds et les plateaux pour la chaîne fabriquant les tables (chaîne 1) et les planchettes pour la chaîne produisant les meubles (chaîne 2). La même valeur étant appliquée aux coefficients  $\lambda$  relatifs aux fournitures réceptionnées pour la fabrication d'un même produit, nous choisissons de noter ces coefficients de manière générique en distinguant ceux de la chaîne 1, notés  $\lambda$ , de ceux de la chaîne 2, notés  $\lambda'$ .

Les scénarios d'expérimentations (E1 à E11) définis en §5.3.2 sont ensuite simulés pour différentes valeurs de  $\lambda$  et  $\lambda'$ , les autres paramètres étant fixés à  $\mu = 50\%$  et  $\gamma = 100\%$ .

| $\lambda$ | $\lambda'$ | Dernier scénario pour lequel il y a convergence vers une solution |
|-----------|------------|---|
| 1         | 1          | E11   |
| 0.01      | 1          | E11   |
| 0.01      | 0.1        | E4  |
| 1         | 0.1        | E4  |
| 0.1       | 0.01       | E3  |

Tableau 5.3 : Simulations effectuées en fonction des variations des paramètres  $\lambda P$  ( $\lambda$  et  $\lambda'$ )

Les premiers résultats nous montrent (tableau 5.3) que les simulations réalisées sur l'ensemble des expérimentations n'ont pas toutes convergé vers une solution de planification, exception faite des deux premiers jeux de valeur.

Pour ces derniers, la figure 5.12 détermine les écarts de coûts techniques qui existent entre les deux solutions.

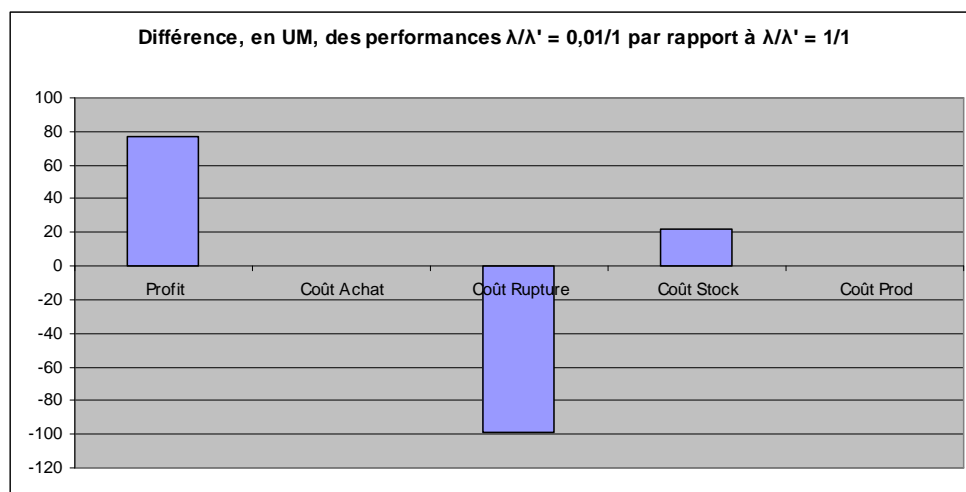


Figure 5.12 : Différence des performances avec  $\lambda/\lambda' = 0,01/1$  par rapport à  $\lambda/\lambda' = 1/1$

Avec un coefficient  $\lambda'=1$  et un coefficient  $\lambda$  réduit, le profit est légèrement augmenté. Cela s'explique par le comportement de l'assembleur, qui préfère anticiper la production. De fait, il consomme plus tôt les composants en stock (réduction des coûts de stock en matières premières) ; il augmente le nombre de produits finis en stock et donc les coûts de stockage associés, ces derniers étant largement compensés par la disparition de coûts de rupture. La différence reste cependant négligeable.

Dans le cas des autres jeux de valeurs pour les paramètres  $\lambda$  et  $\lambda'$ , les processus de négociation ne convergent plus pour les variations d'amplitude de la demande déterminées par le scénario E3 et les scénarios suivants. Les échanges de plans réalisés dans le cadre de la négociation perdurent indéfiniment et les performances du « pilotage par chaînes » ne peuvent pas être calculées.

Afin de mieux comprendre les mécanismes qui conduisent à la non convergence du processus de négociation, intéressons-nous au cas où  $\lambda/\lambda' = 1/0,1$  pour l'expérimentation E4. Dans ce contexte, les six premiers échanges servent à répartir la capacité de l'assembleur entre les deux chaînes logistiques. Le centre hiérarchique de la chaîne des meubles se trouve alors dans une situation où la recherche du meilleur profit global tend à stocker les planchettes chez l'assembleur, alors que ce dernier voit son profit local augmenter s'il diminue le niveau de ce même stock. Les deux stratégies s'opposent : l'assembleur tend à adapter les approvisionnements en planchettes à ses propres contraintes de production (et non par rapport à celles de la production de la scierie 3, ressource goulot de la chaîne – le plan de production de l'assembleur n'est donc pas remis en cause). Ayant modifié les plans d'approvisionnement et non de production, la répartition des capacités, qui est au cœur de la négociation, reste inchangée, n'amenant pas de nouvelles contraintes au niveau des centres hiérarchiques. Ceux-ci ne peuvent alors pas, par un nouveau calcul de planification, aboutir à de meilleurs plans de production que ceux obtenus lors de l'itération précédente dans le processus de négociation. D'où la poursuite des échanges de manière infinie...

Face à ce constat, nous pouvons conclure de manière générale sur la non convergence du processus de négociation, lorsque celui-ci est lié à une situation de conflits ne conduisant pas à une remise en cause des plans de production. Cette non convergence diminue la portée d'application du processus de négociation, tel qu'il est défini.

## 5.5 Amélioration de la convergence du processus de négociation

Afin d'éviter des situations bloquantes dans la négociation (nombre infini d'échanges), nous proposons de forcer la convergence du processus en recourant à certaines stratégies ayant pour but de réduire les facteurs à l'origine des conflits. Deux stratégies sont plus particulièrement discutées et expérimentées dans ce paragraphe.

### 5.5.1 Définition de nouvelles stratégies facilitant la convergence

Les stratégies retenues décrivent les cas où l'un des acteurs (que ce soient les centres hiérarchiques ou le centre de décision local) fait progressivement preuve d'autorité dans la négociation jusqu'à imposer sa décision dans l'arbitrage des conflits.

#### *Prépondérance de l'assembleur dans l'arbitrage des conflits*

L'une des premières causes de conflits réside dans le fait qu'à chaque itération du processus, la capacité disponible (calculée par différence entre la capacité maximum et les charges induites par les travaux à réaliser) est systématiquement et entièrement redistribuée à chacun des centres hiérarchiques.

La solution à ce problème peut alors consister en une diminution progressive de la redistribution de la capacité disponible, au fur et à mesure des itérations du processus de négociation. Ce dernier propose alors 100% de la capacité disponible au premier échange, puis 90% au second, puis 80% au troisième... jusqu'à arriver à ne plus redistribuer la capacité disponible (à la dixième itération). Ainsi, les centres hiérarchiques se voient progressivement contraints de proposer des plans de production sous contraintes de capacité, telles qu'elles sont imposées par l'assembleur, évitant ainsi toute nouvelle situation de conflit.

Si cette stratégie s'avère par principe intéressante dans le cas de conflits sur le plan de production, nous pouvons néanmoins d'ores et déjà conclure sur son inefficacité à faciliter la convergence dans le cadre de recherche de solutions liées à des conflits n'impliquant pas le non respect des plans de production (i.e. lorsqu'il n'y a que des conflits sur les plans d'approvisionnement, comme c'est le cas lorsque  $\lambda/\lambda' = 1/0,1$ ). Cette stratégie, seule, ne permet pas de répondre à tous les problèmes de non convergence.

#### *Prépondérance des centres hiérarchiques dans l'arbitrage des conflits*

Le principe retenu tend à faire augmenter progressivement l'importance du respect des consignes issues des décisions des centres hiérarchiques, au fur et à mesure des itérations du processus de négociation. Cette stratégie se traduit par une valeur des coefficients  $\lambda_p$  qui est augmentée (doublée dans nos simulations) à chaque itération.

En augmentant ainsi les coûts de pénalité en cas de changement dans les plans d'approvisionnement, les centres hiérarchiques deviennent prépondérants dans l'arbitrage des conflits. A force d'augmenter ces coûts, le maillon commun ne peut plus en effet se permettre de privilégier son propre intérêt, le profit ainsi réalisé étant largement dégradé par les pénalités liées au non respect des consignes. De fait, la domination qu'auront les coûts de pénalités sur les coûts techniques accélère la négociation qui pourra donner lieu à un accord.

### 5.5.2 Expérimentations des stratégies

Les différentes stratégies sont testées à partir de l'une des expérimentations où la non convergence du processus de négociation a pu être observée. Le cas retenu correspond aux valeurs de paramètres suivantes :  $\lambda/\lambda' = 1/0,1$  ;  $\Phi_p = 0$  ;  $\gamma$  est fixé à 10% (simulations non convergentes non plus), et non 100%, pour se placer dans une situation encore plus défavorable (voir figure 5.11 montrant l'évolution du profit en fonction du choix de  $\gamma$ ) et prouver ainsi que ces stratégies sont valables également dans des cas *a priori* dégradés. Suivant les expérimentations E1 à E11, le paramètre  $\mu$  est calculé en fonction des demandes clients.

#### *Stratégie reflétant la prépondérance de l'assembleur dans la négociation*

Cette stratégie est testée dans le cas où  $\lambda/\lambda' = 0,1/0,01$ . Cependant, le fait qu'à chaque itération du processus, la capacité disponible est entièrement redistribuée à chacun des centres hiérarchiques peut engendrer de nouveaux conflits, à propos par exemple du positionnement d'une charge qui peut osciller entre une période et une autre dans la négociation : c'est précisément le cas lorsque  $\lambda/\lambda' = 0,1/0,01$ . En fait, dans cette situation, le centre de décision de la chaîne 2 lisse la production par rapport à la scierie 3 (ressource goulot) et préfère engendrer des stocks de produits finis (moins chers) chez l'assembleur. Cependant, au vu de la demande (imposée par le centre de décision de la chaîne 2), l'assembleur préfère différer une partie de la production, limitant ainsi les stocks en produit fini. Il modifie alors les plans de production et d'approvisionnement, afin de satisfaire son propre intérêt. Or, comme la scierie 3 (fournisseur de l'assembleur) n'est pas parfaite en raison de sa capacité finie, la solution proposée par l'assembleur ne peut être validée par le centre de décision de la chaîne 2, qui maintient sa première proposition, d'où la poursuite de la négociation. L'application de cette stratégie n'est donc pas concluante sur le principe de convergence.

#### *Stratégie conjointe*

La stratégie reflétant la prépondérance de l'assembleur dans l'arbitrage des conflits est mise en œuvre conjointement au principe de dominance des centres hiérarchiques dans le processus de négociation. Dans les dix premières itérations, on applique uniquement la technique de prépondérance de l'assembleur. Si la négociation ne se finit pas avant la dixième itération, alors il est sûr que la négociation ne convergera pas, puisqu'à cet état, l'assembleur ne redistribue plus la capacité disponible. Il n'y a donc plus de conflit possible sur les plans de production, mais il peut en rester sur les plans d'approvisionnement, comme nous l'avons vu précédemment. Il faut alors user de la seconde technique, qui se focalise d'avantage sur ces derniers pour conclure la négociation.

L'analyse des performances obtenues lors de l'application conjointe des deux stratégies montre de bons résultats (figure 5.13) : les performances du pilotage par chaîne sont quasiment celles du pilotage centralisé.

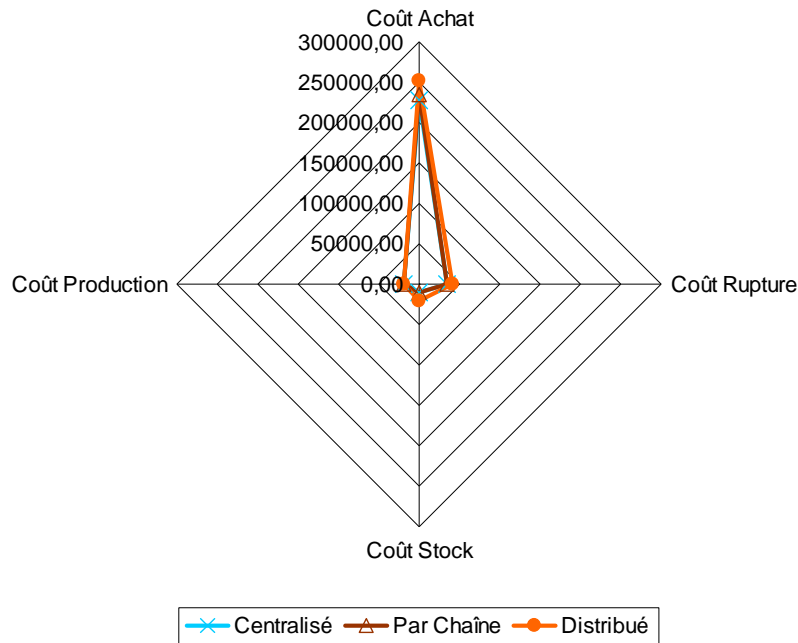


Figure 5.13 : Coûts moyens avec  $\lambda/\lambda' = 1/0,1$  avec une stratégie conjointe des mécanismes de convergence

En contrepartie, de nombreux échanges sont nécessaires avant de converger vers la solution la plus consensuelle: il faut en moyenne 10,6 échanges, soit environ 10 fois plus d'échanges qu'avec des coefficients  $\lambda_p$  et  $\Phi_p$  plus grands et sans processus de convergence.

*Stratégie reflétant la prépondérance des centres hiérarchiques dans la négociation*

La même série d'expérimentations est testée ici, en assurant la convergence du processus de négociation en doublant uniquement la valeur des coefficients  $\lambda_p$  à chaque itération. Les performances mesurées sont alors comparées à celles obtenues en assurant la convergence du processus de négociation par une stratégie combinée (figure 5.14).

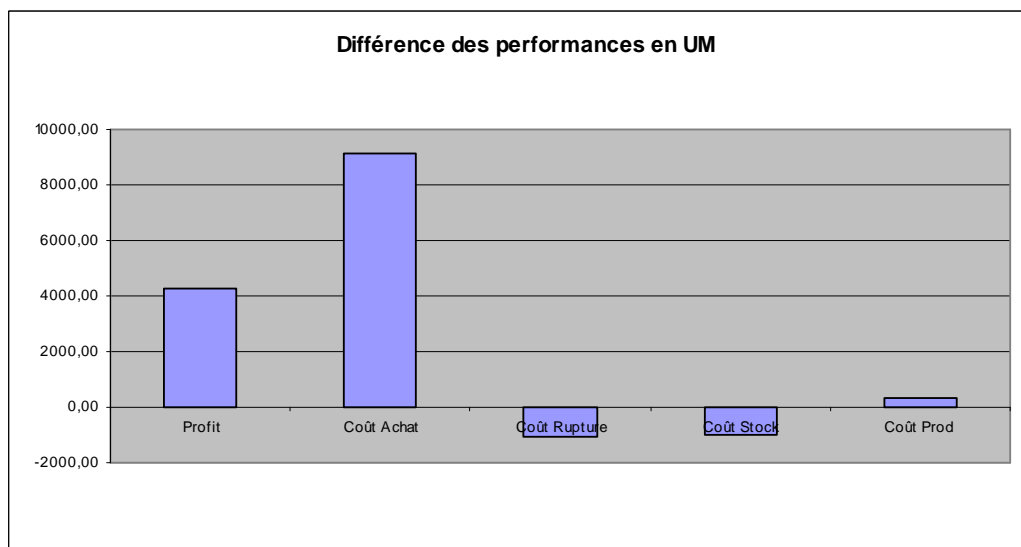


Figure 5.14 : Différence des performances avec le processus arbitré par les centres hiérarchiques par rapport au processus de convergence combiné



Nous pouvons tout de suite conclure en listant quelques intérêts de cette solution par rapport à la stratégie combinée :

- Elle est plus simple à mettre en place du fait d'une technique moins complexe.
- Les expérimentations menées montrent un nombre moyen d'itérations relativement faible pour parvenir à une solution : 3,4 échanges en moyenne dans le cas présent. Il y a donc moins de calcul et moins de temps passé à planifier les activités.
- Les performances ainsi obtenues sont meilleures, avec un gain de plus de 4000 unités monétaires, à comparer aux 80 unités monétaires gagnées avec la stratégie combinée.

D'après ces simulations, il est nettement préférable pour les centres hiérarchiques d'user de la seconde stratégie, plus rapide et plus rentable, et qui permet d'imposer progressivement leurs plans d'approvisionnement et ainsi de garantir la cohérence des flux sur toute la chaîne logistique.

## **5.6 Conclusion du chapitre**

Le problème d'allocation de capacité est bien connu dès lors qu'il faut gérer des ressources polyvalentes et partagées. C'est le cas en gestion de production, aussi bien à l'intérieur d'une entreprise que dans un réseau de chaînes logistiques dans lequel des entreprises travaillent pour plusieurs chaînes. Notre cas-type propose l'analyse de cette problématique dans le cadre d'une architecture de pilotage par chaîne.

Dans notre approche, l'allocation de capacité est négociée entre les différents centres de décision de niveau supérieur, via le centre de décision local et partagé qui est le seul à connaître la capacité du maillon commun.

Plusieurs processus de négociation ont été testés en jouant, d'une part, sur les paramètres du pré-partage de la capacité et, d'autre part, sur des mécanismes d'aide à la convergence du processus.

Il s'avère que, lorsque le maillon commun propose aux centres hiérarchiques des sur-capacités (poker menteur), il provoque volontairement des conflits qui permettent, après négociation, d'allouer judicieusement la capacité de production, puisque le pilotage par chaîne devient quasiment aussi performant que le pilotage centralisé.

En termes de perspectives des travaux présentés dans ce chapitre, de nombreux scénarios peuvent être imaginés pour poursuivre ces travaux, comme :

- la possibilité de redistribuer la capacité disponible de façon non équitable envers les centres hiérarchiques,
- l'application de ces principes en horizon glissant, avec notamment un pré-partage en fonction de la charge (ou demande), mais aussi et surtout en fonction de l'historique comme les ruptures initiales des centres hiérarchiques,
- l'application de ces principes sur d'autres capacités : capacité de stockage, capacité de transport,
- de la même façon, l'extension et la généralisation à une ressource partagée pour N centres hiérarchiques,
- l'extension et la généralisation à une chaîne logistique constituée de plusieurs maillons partagés, impliquant des négociations en parallèle,
- ...

---

## Conclusion générale et perspectives

---

## Conclusion générale et perspectives

### *Conclusion générale :*

Dans ces travaux, nous nous sommes intéressé à l'optimisation de la planification des activités de production de chaînes logistiques. La portée de la planification couvre les processus principaux (approvisionnement, production, distribution et vente) de chaque entreprise de la chaîne logistique.

Notre objectif était d'élaborer un outil pour l'analyse de l'efficacité de l'organisation structurelle et décisionnelle (en planification) des partenariats d'entreprises. Nous avons comparé trois architectures-type de pilotage :

- Le pilotage distribué, basé sur de simples relations client-fournisseur, en considérant le délai de transfert de l'information, et son traitement.
- Le pilotage centralisé, avec un unique centre de décision supervisant l'ensemble du réseau d'entreprises.
- Le pilotage mixte, cherchant à regrouper certains partenaires pour globaliser leurs décisions.

Les architectures de pilotage, en dépit de leur variété, dérivent de combinaisons de ces architectures-type appliquées à des sous-ensembles de la chaîne. Face à un cas particulier, le référentiel de modélisation présenté au chapitre 2 permet d'identifier l'architecture de pilotage, en repérant tout centre de décision suivant son niveau décisionnel, ainsi que les interrelations qu'il entretient avec les autres centres de décision intra et inter-niveau.

Nous avons mené nos études de performance sur un cas académique de réseau d'entreprises à complexité maîtrisée qui peut être considéré, suivant le pilotage mis en œuvre, comme une organisation multi-sites intra-entreprise ou comme un réseau d'entreprises indépendantes.

Nous avons posé que toutes les entreprises de la chaîne logistique travaillent à la commande et que le paramétrage de la chaîne (structure physique, architecture de pilotage) est stable (à l'échelle de temps de la planification).

Les conclusions présentées ci-dessous se réfèrent aux objectifs cités à la fin du premier chapitre :

### **1) Conclusion sur l'objectif 1 - Caractérisation et amélioration des performances de la chaîne logistique**

Les performances, telles que la robustesse et la réactivité des pilotages, sont interprétées à partir des mesures de variations, par rapport à un scénario de référence, de variables quantifiables sur l'horizon : gain des ventes, coûts engendrés par le stockage, la production, les ruptures de stock, ...

Pour chaque jeu de simulations effectué, nous avons procédé ainsi. Cependant, vu le nombre de simulations, nous avons dû faire des moyennes sur les mesures obtenues par type de scénario (par exemple, simulations sur une chute de la capacité de production en faisant varier la date de la chute).

Nos simulations ont montré qu'une vision globale d'une chaîne logistique (pilotage centralisé) offre des performances accrues en termes de robustesse et de réactivité (telles que nous les avons définies) par rapport aux autres pilotages. Nous sommes en effet ici dans le cas idéal –en termes d'optimisation - où un même centre de décision connaît l'ensemble des données et contraintes de l'activité à planifier. Néanmoins, le pilotage centralisé d'une chaîne de grande taille nécessiterait, pour contenir la masse des données, des mécanismes d'agrégation des données, qui viendraient introduire des incertitudes. Nous n'avons pas, dans le cadre de cette thèse, considéré ces mécanismes.

Dans l'étude de la robustesse, nous avons montré que les optima de planification peuvent s'avérer très sensibles aux incertitudes des données portant sur la demande et l'approvisionnement. Ceci peut s'avérer réellement critique en situation de flux tendu sur la chaîne. La qualité de ces deux types de données exogènes apparaît donc tout aussi importante l'une que l'autre, or il nous semble que la littérature ne porte pas la même attention à la modélisation des processus d'approvisionnement qu'à la prévision des demandes.

Concernant la réactivité, le pilotage distribué s'avère aussi performant que le pilotage centralisé s'il existe un certain niveau de collaboration entre les acteurs tout au long de la chaîne, et si une autonomie locale de réaction est possible entre deux instants de replanification. Ici, le pilotage par chaîne (cas particulier du pilotage mixte) n'obtient pas nécessairement de bons résultats. Cela révèle le rôle joué par le partage de la capacité de production de l'assembleur, maillon commun aux deux chaînes logistiques, et a motivé une étude spécifique à ce phénomène (chapitre 5).

## **2) Conclusion sur l'objectif 2 - Analyse comparative d'architectures décisionnelles**

En dépit du caractère générique que nous avons cherché à donner au cas-type et aux architectures de pilotage qui s'y réfèrent, l'interprétation des résultats tirés de nos simulations est certes tributaire du cas étudié. Nous nous garderons donc d'extrapoler exagérément nos conclusions à la diversité des configurations des chaînes logistiques. Par contre, nous pensons pouvoir mettre en avant l'intérêt des outils de modélisation et d'évaluation que nous avons élaborés *pour l'évaluation de performance des alternatives de pilotage d'une chaîne logistique donnée*.

L'analyse comparative d'architectures décisionnelles se justifie tout particulièrement dans un contexte de *configuration* d'une chaîne logistique. A cet effet, toutes les informations listées dans le tableau 3.1 peuvent être modifiées, ainsi que les ensembles définis au § 3.2.1.1.

Par ailleurs, au stade de *l'exploitation* d'une configuration donnée, les analyses comparatives peuvent permettre d'évaluer l'impact de modifications paramétriques (quant aux données de configuration de la chaîne, quant à la fonction de coût à optimiser) sur les performances espérées. Enfin, cet outil peut être utilisé en tant qu'aide à la décision en planification, notamment pour tester les temps de réponse de la chaîne face à l'occurrence d'un événement imprévu (opportunité de commande, dysfonctionnement d'un élément de la chaîne).

## **3) Conclusion sur l'objectif 3 - Elaboration d'un modèle analytique générique pour la planification**

Pour simuler les différentes architectures de pilotage, nous avons développé un outil composé notamment d'un modèle analytique générique, dans le sens où il prend en compte les aspects techniques et économiques invariants et nécessaires à la planification. Ce modèle élabore une

vue unifiée des problématiques de planification coopérative, et tend à améliorer l'interopérabilité des acteurs de la chaîne. Il est instanciable à tous les centres de décision impliqués dans les architectures de pilotage, quels qu'en soient le niveau et le rang.

Rappelons ici *quelques particularités du modèle de planification* :

- Le modèle de planification regroupe, sous un même format, l'ensemble des contraintes sur les capacités de production, de stockage et de transport.
- La portabilité du modèle de planification à tout centre de décision de la chaîne logistique est facilitée par des notations ensemblistes. Au-delà de la caractérisation générique du modèle de planification, celui-ci reste « modelable » par le centre de décision, puisque ce dernier définit un certain nombre de paramètres traduisant sa propre politique de gestion et ses préférences stratégiques (coefficients pondérateurs dans le critère, coûts de rupture, équation de répartition de la capacité, ...).
- Le critère d'optimisation est de nature économique et représente le profit recherché par le centre de décision, cherchant ainsi à lier performance technique et performance économique.
- Le critère d'optimisation traduit la problématique de décision propre à ce dernier, ce qui permet d'étudier le rôle joué par la distribution et l'accessibilité des informations au sein de l'architecture de pilotage.
- Tel qu'il a été défini, le modèle fournit toujours une solution de planification, quitte, en cas de problème sur-contraint, à accepter des ruptures de stock, en d'autres termes à tolérer des retards de livraison pour certains clients.

La résolution du modèle mathématique de planification s'effectue au travers d'une interface Excel munie d'une macro Visual Basic appelant le solveur Xpress-MP. Le résultat décrit les décisions à prendre (quantités à lancer en production, à commander pour les approvisionnements) optimisant le critère et donc les performances de la chaîne.

En phase d'exploitation, cet outil permet de trouver la solution optimale de planification en fonction des informations qui lui sont données. L'utilisateur reste ensuite libre de choisir cette solution ou de la modifier.

#### **4) Conclusion sur l'objectif 4 - Analyse des chaînes croisées**

Enfin, nous nous sommes attaché à l'analyse des chaînes logistiques croisées, i.e lorsqu'une entreprise (maillon commun) est impliquée dans plusieurs chaînes logistiques, ce qui demande des arbitrages sur l'utilisation des ressources. Dans nos simulations, nous nous sommes intéressé au partage de la capacité de production du maillon commun, négociée entre les centres de décision de niveau supérieur gérant individuellement les chaînes, via le centre de décision local gérant le maillon commun.

Nous avons comparé différentes procédures d'échange d'informations pour aider à la convergence du processus de négociation du partage de la capacité du maillon commun et montré que le pré-partage initial de la capacité du maillon commun est un paramètre important, car celui-ci peut provoquer ou non le besoin d'une négociation entre le maillon commun et les centres commanditaires. Ces négociations permettent d'ajuster la répartition de la capacité en fonction des demandes des centres de décision de niveau supérieur, mais aussi en fonction du profit local recherché par le maillon commun. Lorsqu'il y a négociation, les résultats du pilotage par chaîne sont semblables à ceux du pilotage centralisé.

*Perspectives :*

Nous listons ici les perspectives principales ouvertes par nos travaux :

**I. Généralisation du modèle de planification :****1) L'ajout de contraintes dans le modèle, notamment :**

- L'introduction de gabarits de commande chez les fournisseurs, définissant les quantités minimale et maximale des approvisionnements (Galasso, 2007). Cela revient à cadrer les commandes au fournisseur entre deux bornes fixées généralement dans un contrat entre le client et le fournisseur.
- La production par lot (*lot sizing*) et la prise en compte des séries économiques. Cela demande d'ajouter des variables entières dans le modèle d'optimisation, qui deviendrait à variables mixtes (entières et réelles). Notons que la normalisation des tailles de lot peut aussi s'appliquer sur les livraisons pour optimiser les chargements.
- La prise en compte des rebuts de production : le taux de rebut moyen peut être pris en compte dans les équations (1) et (2) lors de l'élaboration des plans de production.
- La définition de niveaux de stock planchers (dits aussi de sécurité) pour pallier les aléas.
- La prise en compte des nomenclatures divergentes. Lorsque le coefficient de nomenclature est inférieur à 1, cela sous-entend qu'une portion de composant suffit à élaborer un produit, ou qu'un même composant peut servir à fabriquer plusieurs produits de même référence. Cependant, si l'on veut considérer qu'un composant donne, lorsqu'il est travaillé,  $n_1$  produits de type A et  $n_2$  produits de type B (par exemple, le débitage d'une bille de bois donne des planches, des poutres,... et des débris (chutes, écorces et sciure)), alors il faut rajouter un coefficient  $K'_{r,p,p}$  dans l'équation (1), qui traduira le fait que le traitement d'un composant peut engendrer divers produits, dont certains ne répondent pas à une demande client.
- Le calcul de la durée des ruptures. Avec notre outil, nous savons à chaque période le nombre de ruptures, mais nous ne pouvons pas donner leur durée. Or cet élément peut s'avérer utile pour répartir la charge entre les différents clients, ou pour chercher à le minimiser via le critère d'optimisation. Pour cela, il faut repérer chaque produit et modéliser leur traçabilité.

**2) La prise en compte des activités de sous-traitance.** Un phénomène, qui s'est beaucoup développé durant les dernières années, est la sous-traitance (*outsourcing*). Celle-ci permet à une entreprise de se décharger d'une partie du processus de fabrication d'un produit pour des raisons stratégiques ou techniques (compétence ou capacités insuffisantes). Un sous-traitant se distingue d'un fournisseur par le fait qu'on lui achète du travail et non des pièces. La matière première est fournie par l'entreprise qui achète le travail. Il conviendrait d'ajouter à notre cas type une relation de sous-traitance entre un donneur d'ordre (l'assembleur) et une société de sous-traitance. Les flux de transports entre ces entités seraient alors bidirectionnels : flux de composants et flux de produits semi-finis.

## II. Extension des hypothèses de modélisation :

- 1) **L'agrégation de données.** Nous envisageons d'étendre notre modèle de pilotage de chaînes logistiques en mettant en place un mécanisme d'agrégation/désagrégation des données de planification d'un niveau de pilotage à l'autre, en vue de faire face à la complexification du problème d'optimisation pour les chaînes de grande taille. Des mécanismes génériques d'agrégation des données et de désagrégation des plans ont été modélisés au LAPS (Zolghadri 1998, Lecompte-Alix 2001) et peuvent être intégrés dans notre modèle de planification, afin de disposer d'un outil de planification multi-niveaux permettant d'affiner progressivement la planification d'un niveau à l'autre, et relier dans un continuum les décisions de planification, depuis la macro-planification jusqu'aux décisions finales d'ordonnancement, ce qui constitue une approche alternative à la pratique traditionnelle des entreprises, laquelle sépare la partie planification de la partie ordonnancement. Cet axe de recherche s'inscrit dans l'investigation du potentiel de réactivité des approches de planification agrégée rapide.
- 2) **Le rejet de commande.** Dans les hypothèses de notre étude figurait l'acceptation (par la force des choses) par le client d'être livré en retard en cas de rupture. Nous envisageons d'expérimenter les « ventes perdues » : les produits livrés trop en retard sont refusés par le client. Lors de la replanification, il faut prendre en compte la réduction de demande résultant de ces refus ou, si la date de livraison est déjà passée, une réduction des ruptures initiales ou une augmentation des stocks de produits finis. Cette situation dégraderait sans doute les performances obtenues, mais d'un autre côté, si les produits ne sont pas personnalisés, les invendus pour le client initial peuvent être revendus aussitôt, sur stock, à d'autres clients.
- 3) **La planification à horizons/périodes non synchrones.** Nous avons supposé dans notre étude que tous les centres de décision ont la même période de replanification et le même horizon, et qu'ils prennent leur décision au même instant (instant éventuellement différé en cas de délai d'information non nul). Mais bien souvent, chaque entreprise fonctionne, au sein d'une chaîne logistique, avec ses propres horizon/période de replanification, et les décisions peuvent se propager de façon asynchrone. Cet asynchronisme des décisions des différents partenaires peut dégrader la performance de la chaîne, comme cela a été montré au LAPS avec notre outil dans le cadre de travaux extérieurs à cette thèse (Amrani-Zouggar et al., 2007), et de manière générale accroître les délais de réaction face à un aléa ou à une nouvelle demande.

## III. Utilisation des travaux et de l'outil proposé :

- 1) **L'aide à la négociation fournisseur-client.** Il s'agit d'utiliser notre outil pour la négociation des quantités commandées et des délais de livraison demandés par un client. Cette utilisation du simulateur par un agent commercial serait non pas périodique, mais événementielle, l'événement étant une nouvelle demande d'un client. L'agent ajouterait celle-ci au plan de charge et, par une nouvelle planification, évaluerait si le client peut obtenir les produits dans le

délai demandé, et sinon le délai nécessaire pour les obtenir. Si le client accepte le délai ainsi évalué, la commande devient ferme.

- 2) **Le couplage avec un simulateur de suivi de production.** Dans cette perspective, nous souhaitons coupler notre outil décisionnel à un simulateur de flux physique à partir duquel remonterait le suivi de production. Ceci permettrait de renforcer le pouvoir d'analyse de notre outil en matière d'évaluation de performances, tout particulièrement pour ce qui concerne la réactivité.
- 3) **La poursuite de l'étude des chaînes couplées.** De nombreux scénarios peuvent être imaginés pour poursuivre l'étude du problème de partage de la capacité d'un maillon commun :
  - La possibilité de redistribuer la capacité disponible de façon non équitable envers les centres hiérarchiques.
  - L'extension des principes de négociation de capacité au cas de la planification en horizon glissant, avec notamment un pré-partage en fonction de la charge (ou demande), mais aussi et surtout en fonction de l'historique (notamment, nombre et durée des ruptures initiales des centres hiérarchiques).
  - L'application des principes de négociation au partage d'autres capacités : capacité de stockage, capacité de transport.
  - La généralisation au cas d'un maillon commun à N centres hiérarchiques.
  - La généralisation au cas d'un réseau d'entreprises constitué de plusieurs maillons partagés, impliquant des négociations en parallèle.

Nous croyons que notre outil de modélisation par programmation mathématique permet de répondre au point I, de bien préparer le point II et de fournir un outil efficace pour le point III.





---

## Bibliographie

---

## Bibliographie

Amrani-Zouggar et al., 2007 : A. Amrani-Zouggar, J. François, J.C. Deschamps et J.P. Bourrières. *Multi-echelon production planning process with no time coordination*. 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics, 27-30 Septembre 2007, Sibiu, Roumanie.

Anciaux et Mirdamadi, 2006 : D. Anciaux et S. Mirdamadi. *Gestion environnementale de la chaîne logistique : prise en compte des transports intermodaux*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bordeaux, France. 2006.

Ballot et Fontane, 2006 : E. Ballot et F. Fontane. *Pilotage de la chaîne logistique : rendement et efficience du transport*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bordeaux, France. 2006.

Bazet et De Terssac, 2001 : I. Bazet et G. De Terssac. *Analyse sociologique du travail de planification*. In Organisation et gestion de la production de J. Erschler et B. Grabot. Edition Hermès, Chapitre 4, pp 90-129, 2001.

Beamon, 1998 : B.M. Beamon. *Supply chain design and analysis : Models and methods*. International Journal of Production Economics, 55 (1998) 281-294. 1998.

Botta-Genoulaz, 2000 : V. Botta-Genoulaz. *Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness*. International Journal of Production Economics, Vol. 64, Issues 1-3, pp 101-111, 2000.

Botta-Genoulaz, 2003 : V. Botta-Genoulaz. *Les systèmes d'information supports à la chaîne logistique*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.

Botta-Genoulaz, 2005 : V. Botta-Genoulaz. *Principes et Méthodes pour l'Intégration et l'Optimisation du pilotage des Systèmes de Production et des Chaînes Logistiques*. Rapport de HDR, tome 1, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Université Claude Bernard de Lyon 1, 2005.

Botta-Genoulaz et al., 2004 : V. Botta-Genoulaz, I. Defun, F.A. Gruat-La-Forme, A. Martinez, P.A. Millet et C. Pellegrin. *Etat des lieux des systèmes d'information supports de la chaîne logistique intra et/ou interentreprises*. COPILOTES – Annexes 4.2 du Rapport de 2<sup>ème</sup> année : Livrable 2.1, 2005.

Botta-Genoulaz et Millet, 2005 : V. Botta-Genoulaz et P.A. Millet. *A classification for better use of ERP systems*. Computers in Industry, Vol. 56, Issue 6, pp 572-586, 2005.

Bouchriha et Ladet, 2002 : H. Bouchriha, et P. Ladet. *Une modélisation mathématique de la décision : « faire ou faire faire ? »*. MOSIM'01, APII-JESA, Vol. 36, 2002, pp 131-148.

- Bourrières et al., 2001 : J.P. Bourrières, T. Lecompte, J.C. Deschamps, et R. Alami. *Un cadre formel de décision pour la planification multiniveau des systèmes de production distribués*. Dans *Pilotage distribué des systèmes de production*. Journal européen des systèmes automatisés, Vol. 35, n° 7-8, 2001.
- Bourrières et al., 2005 : J.P. Bourrières, B. Grabot et C.Mercé. *Pilotage des systèmes multi-sites de production : outils industriels et méthodes avancées*. Techniques de l'Ingénieur, S 7662, 15 pages, Septembre 2005.
- Brandolese and al., 2000 : A. Brandolese, A. Brun, et A. Portioli-Staudacher. *A multi-agent approach for the capacity allocation problem*. International Journal of Production Economics, Vol. 66, Issue 3, pp269-285, 2000.
- Camalot, 2000 : J.P. Camalot. *Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources*. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2000.
- Chan et al., 2004 : F. T.S. Chan, S. H. Chung, S. WADHWA. *A heuristic methodology for order distribution in a demand driven collaborative supply chain*. International Journal of Production Research, 2004, Vol. 42, No. 1, pp 1-19.
- Chen, 2005 : D. Chen. *Deliverable D6.1: Practices, principles and patterns for interoperability*. Deliverable D6.1 du réseau d'excellence Interop. URL : [www.interop-noe.org](http://www.interop-noe.org). Mai 2005.
- Christopher, 1992 : M.L Christopher. *Logistics and Supply Chain Management*, Pitman Publishing, London, 1992.
- Cooper et al., 1997 : M.C. Cooper, D.M. Lambert et J.D. Pagh. *Supply Chain Management : More Than a New Name for Logistics*. The International Journal of Logistics Management 8(1), pp 1-13, 1997.
- Courty, 2003 : P. Courty. *Les enjeux industriels et les nouvelles problématiques scientifiques - De la logistique à la logistique globale*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.
- Croom et al., 2000 : S. Croom, P. Romano, M. Giannakis. *Supply chain management : an analytical framework for critical literature review*. European Journal of Purchasing and Supply Management 6, 2000, pp 67-83.
- Dany, 2003 : D. Dany. *Les problématiques et enjeux industriels chez Caterpillar*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.
- Despontin-Monsarrat et al., 2005 : E. Despontin-Monsarrat, C. Briand, P. Esquirol. *Approche par contraintes pour une aide à la coopération inter-entreprises*. 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 7-10 Juin 2005, Besançon, France.

Dominguez et Lashkari, 2004 : H. Dominguez, R. S. Lashkari. *Model for integrating the supply chain of an appliance company: a value of information approach*. International Journal of Production Research, 01 June 2004, Vol. 42, No 11, pp 2113-2140.

Doumeingts et Vallespir, 1994 : G. Doumeingts, B. Vallespir. *Gestion de production*. Collection technique de l'ingénieur, GRAI/ LAP, Université de Bordeaux I, Bordeaux, France, 1994.

Doumeingts et al., 1998 : G. Doumeingts, B. Vallespir et D. Chen. *Decisional Modelling GRAI grid*. International Handbook on information systems, Ed. P. Bernus, K. Mertins et G. Schmidt. Springer Verlag. Heidelberg, Chapitre 14, pp 313-337, 1998.

Dudek et Stadtler, 2005 : G. Dudek, et H. Stadtler. *Negotiation-based collaborative planning between supply chains partners*. European Journal of Operational Research, 163, 2005, pp 668-687.

Dupuy et al., 2004 : C. Dupuy, V. Botta-Genoulaz et A. Guinet. *Batch dispersion model to optimize traceability in food industry*. Journal of Food Engineering, Special Issue on "Operational Research and Food Logistics", Vol. 70, Issue 3, pp 333-339, 2005.

Eisenhardt, 1989 : K.M. Eisenhardt. *Building Theories from Case Study Research*. Academy of Management Review, vol. 14, n° 4, pp 532-550, 1989.

Estampe et al., 1999 : D. Estampe, A. Harreguy, V. Males, M. Mamère, S. Nougaret et B. Truin. *La performance supply chain des acteurs du secteur automobile en France*. Logistique & Management, Vol. 7, n° 1, pp 15-22, 1999.

Fontan et al., 2005 : G. Fontan, C. Mercé, J.C. Hennes, J.B. Lasserre. *Hierarchical scheduling for decision support*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 16, No. 2, pp 235-242, 2005.

François et al., 2005 : J. François, J.C. Deschamps, G. Fontan et J.P. Bourrières. *Modèles de macro-planification pour le pilotage des chaînes logistiques : étude autour d'un cas type*. Revue e-STA – www.see.asso.fr, 2005.

François et Galasso, 2005 : J. François et F. Galasso. *Un cadre générique d'analyse des relations dans la chaîne logistique interentreprises*. 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 7-10 Juin 2005, Besançon, France.

Frein, 2003 : Y. Frein. *Gestion des flux dans un contexte de production/livraison synchrone – cas de l'industrie automobile*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.

Galasso et al., 2005 : F. Galasso, J. François, J. Mahmoudi et SCMIP<sup>8</sup>. *Proposition d'une grille de classification de la littérature en gestion de chaîne logistique (Supply Chain Management)*. 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 7-10 Juin 2005, Besançon, France.

---

<sup>8</sup> Nom collectif Supply Chain Midi-Pyrénées : groupe de travail permettant de favoriser la coopération dans les activités de recherche en gestion de chaîne logistique (SCM) dans la région Midi-Pyrénées et plus largement dans le Sud Ouest et de faire le lien entre les acteurs académiques et industriels.

Galasso et al., 2006a : F. Galasso, C. Mercé et B. Grabot. *Aide à la décision pour la planification des approvisionnements*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 30 mai-1<sup>er</sup> Juin 2006, Bordeaux, France.

Galasso et al., 2006b : F. Galasso, C. Mercé et B. Grabot. *Decision support for supply chain planning under uncertainty*. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM), 17-19 Mai 2006, Saint-Etienne, France.

Galasso, 2007 : F. Galasso. *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

Ganeshan et al., 1998 : R. Ganeshan, E. Jack, M.J. Magazine et P. Stephens. *A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research*, in *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998, pp 841-880.

Génin, 2003 : P. Génin. *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.

Geunes et Chang, 2001 : J. Geunes et B. Chang. *Operations research models for supply chain management and design*, in *Encyclopaedia of Optimization*, C.A. Floudas and P.M. Pardalos Eds, Kluwer Academic Publishers, 2001, 4 : 133-145.

Giménez et Lourenço, 2004 : C. Giménez, H. R. Lourenço. *E-supply chain management: review, implications and directions for future research*. Rapport interne Research Group in Business Logistics GREL-IET, Department of Economics & Business. Disponible à <http://www.econ.upf.es/docs/papers/downloads/769.pdf> . 2004.

Haehling von Lanzanauer et Pilz-Glombik, 2002 : C. Haehling von Lanzanauer, et K. Pilz-Glombik. *Coordination supply chain decisions : an optimization model*. Operations Research Spectrum, Springer-Verlag, 2002, Vol. 24, pp 59-78.

Hatchuel et al., 1997 : A. Hatchuel, D. Saidi-Kabeche, J. C. Sardas. *Towards a new planning and scheduling approach for multistage production systems*. International Journal of Production Research, 1997, Vol. 35, No. 3, pp 867-886.

Hétreux, 1996 : G. Hétreux. *Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions*. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1996.

Huang et al., 2003 : George Q. Huang, Jason S. K. LAU, K. L. Mak. *The impacts of sharing production information on supply chain dynamics : a review of the literature*. International Journal of Production Research, 2003, Vol. 41, No 7, pp 1483-1517.

Huguet, 1994 : M.J. Huguet. *Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production*. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1994.

Jayaraman et Pirkul, 2001 : V. Jayaraman, H. Pirkul. *Planning and coordination of production and distribution facilities for multiples commodities*. European Journal of Operational Research, 133, 2001, pp 394-408.

Kehoe et Boughton, 2001 : D.F. Kehoe et N.J. Boughton. *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, 2001, pp 582-593.

Kirche et al., 2005 : E.T. Kirche, S.N. Kadipasaoglu, B.M. Khumawala. *Maximizing supply chain profits with effective order management: integration of Activity-Based Costing and Theory of Constraints with mixed-integer modelling*. International Journal of Production Research, Vol.43, No. 7, 1 April 2005, pp 1297-1311.

Kleijnen, 2005 : J.P.C. Kleijnen. *Supply Chain Simulation tools and techniques: A Survey*. International Journal of Simulation and Process Modelling, Vol. 1, Nos. 1/2, 2005, pp 82-89.

Khouider et al., 2006 : S. Khouider, T. Monteiro et M.C. Portmann. *Gestion collaborative et distribuée des approvisionnements intégrant le transport*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bordeaux, France. 2006.

Korpela and al., 2002 : J. Korpela, K. Kyläheiko, A. Lehmusvaara, et M. Tuominen. *An analytic approach to production capacity allocation and supply chain design*. International Journal of Production Economics, Vol. 78, Issue 2, pp187-195, 2002.

Lambert et Cooper, 2000 : D.M. Lambert et M.C. Cooper. *Issues in Supply Chain Management*. Industrial Marketing Management, 2000, 29, pp 65-83.

La Londe et Masters, 94 : B.J. La Londe et J.M. Masters. *Emerging Logistics Strategies: Blue-print for the next century*. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, Vol 24, No 7, pp 35-47, 1994.

Lakhal et al., 1999 : S. Lakhal, A. Martel, M. Oral, et B. Montreuil. *Network companies and competitiveness: A framework for analysis*. European Journal of Operational Research, 118, 1999, pp 278-294.

Lakhal et al., 2001 : S. Lakhal, A. Martel, O. Kettani, et M. Oral. *Theory and methodology - On the optimization of supply chain networking decisions*. European Journal of Operational Research, 129, 2001, pp 259-270.

Lauras et al., 2003 : M. Lauras, N. Parrod, O. Telle, J. Lamothe et C. Thierry. *Référentiel de l'entente industrielle : Trois approches dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques*. 5<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel : le génie industriel et les défis mondiaux, ville de Québec, Canada, Octobre 2003.

Lecompte-Alix, 2001 : T. Lecompte-Alix. *Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production réticulaires*. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, 2001.

Lee et Billington, 1993 : H.L. Lee et C. Billington. *Material management in decentralized supply chain*. *Operation Research*, Vol 41, No 5, 1993.

Leung et al., 2006 : S. C.H. Leung, S. O.S. Tsang, W.L. Ng et Y. Wu. *A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment*. *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, Issue 1, pp 224-238, 2007.

Llerena, 2003 : D. Llerena. *Evolution des relations inter-entreprises – Coordination de la Supply Chain et efficacité : une approche économique*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.

Lummus et Vokurka, 2004 : R.R. Lummus, R.J. Vokurka. *Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines*. *Industrial Management & Data Systems*, 1999, pp 11–17.

Mahmoudi et al., 2006 : J. Mahmoudi, J. Lamothe, C. Thierry. *Un modèle de simulation pour coopérer au sein de la chaîne logistique des télécoms*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique. 30 mai – 1<sup>er</sup> Juin 2006, Bordeaux, France.

Marcotte, 1995 : F. Marcotte. *Contribution à la modélisation des systèmes de production : extension du modèle GRAI*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1995.

Maria, 1997 : A. Maria. *Introduction to modeling and simulation*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference.

Melo and al., 2006 : M.T. Melo, S. Nickel et F. Saldanha da Gama. *Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning*. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, Issue 1, pp 181-208, 2006.

Mentzer et al., 2001 : J.T Mentzer, W. Dewitt, J.S. Keebler, S. Min, N.W. Nix, C.D. Smith, Z.G. Zacharia. *Defining the supply chain Management*. *Journal of Business logistics*, Vol 22, No 2, 2001.

Min et Zhou, 2002 : H. Min, G. Zhou. *Supply chain modeling: past, present and future*. *Computers & Industrial Engineering* 43, 2002, pp 231-249.

Monateri, 2003 : J.C. Monateri. *Relations synchrones entre entreprises (DO/F) : Innovation organisationnelle et logistique dans la chaîne de valeur*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.

Monsarrat-Despontin et al., 2005 : E. Monsarrat-Despontin, C. Briand, P. Esquirol. *Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises : une approche par contraintes*. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, Vol. 39, No 7, pp 799-818, 2005.

Morana et Paché, 2000 : J. Morana et G. Paché. *Supply chain management et tableau de bord prospectif : à la recherche de synergies*. *Logistique et Management*, Vol. 8, No 1, 2000, pp 77-88.

Mulvey et al., 1995 : J.M. Mulvey, R.J. Vanderbei, S.A. Zenios. *Robust optimization of large-scale systems*. *Operations Research* 43, pp 264–281, 1995.



Ozdamar et Tülin, 1999 : L. Ozdamar, et Yazgaç Tülin. *A hierarchical planning approach for a production-distribution system*. International Journal of Production Research, 1999, Vol. 37, No. 16, pp 3759-3772.

Ouzizi et al., 2005 : L. Ouzizi, M.C. Portmann, F. Vernadat. *Aide à la décision pour la planification d'une chaîne logistique en utilisant une architecture de pilotage semi-distribuée*. 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 7-10 Juin 2005, Besançon, France.

Pujo et Kieffer, 2002 : P. Pujo et J.P. Kieffer. *Fondements du pilotage des systèmes de production*. Hermès Science Publications. 2002.

Roque, 2005 : M. Roque. *Contribution à la définition d'un langage générique de modélisation d'entreprise*. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, 2005.

Rota-Franz et al., 2001 : K. Rota-Franz, C. Thierry, G. Bel. *Gestion des Flux dans les chaînes logistiques*. In *Performances industrielles et gestion des flux* (P. Burlat, J.P. Campagne) Hermès Traité IC2, 2001, pp 153-186.

Rota-Franz, 1998 : K. Rota-Franz. *Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique*, Thèse de doctorat de l'ENSAE, 1998.

SCC, 1996 : Supply Chain Council. <http://www.supply-chain.org>.

Sepulveda et Frein, 2005 : J.P. Sepulveda et Y. Frein. *Influence de la coordination et du partage d'information sur les temps de retard des tâches dans une chaîne logistique*. Journées Doctorales et Nationales du Groupe de Recherche Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques (JD-JNMACS), 5-7 Septembre 2005, Lyon, France.

Shapiro, 1999 : J.F. Shapiro. *Bottom-Up vs. Top-Down approaches to supply chain modeling*, in *Quantitative models for supply chain management*, Sridhar Tayur, Ram Ganeshan, Michael Magazine. Chapitre 23, p737-759. Operations Research Management Science. Kluwer's International Series. 1999.

Spitter and al., 2005 : J.M. Spitter, C.A.J. Hurkens, A.G. De Kok, J.K. Lenstra, et E.G. Negenman. *Linear programming models with planned lead times for supply chain operations planning*. European Journal of Operational Research, vol. 163, pp 706-720, 2005.

Stadtler et Kilger, 2000 : H. Statler et C. Kilger. *Supply Chain Management and Advanced Planning : concepts, models, software and case studies*, Editions Springer Verlag, 2000.

Syarif and al., 2002 : A. Syarif, Y.S. Yun, et G. Motosuo. *Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach*. Computers & Industrial Engineering, Vol. 43, pp 299-314, 2002.

Tan, 2001 : K.C. Tan. *A framework of supply chain management literature*. European Journal of Purchasing and Supply Management 7, 2001, pp 39-48.

---

Tayur et al., 1999 : S. Tayur, R. Ganeshan, M. Magazine. *Quantitative models for supply chain management*. Kluwer Academic Publishers, 2000.

Telle, 2003 : O. Telle. *Gestion des chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : aide à la coopération au sein d'une relation donneur d'ordres – fournisseurs*. Thèse de doctorat, SUPAERO de Toulouse, 2003.

Thierry et Bel, 2002 : C. Thierry et G. Bel. *Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : outils d'aide à la décision pour l'amélioration du partenariat*. Revue Française de Gestion Industrielle, 2002.

Thomas, 2003 : A. Thomas. *Impact du concept de chaîne logistique sur les systèmes de gestion de production – Le nouveau rôle de la planification tactique et les nouveaux outils*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble, France.

Thomas et Griffin, 1996 : D.J. Thomas, P.M. Griffin. *Coordinated supply chain management*. European Journal of Operational Research. 94, 1996, pp 1-15.

Van Landeghem et Vanmaele, 2002 : H. Van Landeghem et H. Vanmaele. *Robust planning: a new paradigm for demand chain planning*. Journal of Operations Management, vol. 20, Issue 6, pp 769-783, Novembre 2002.

Vincent et al., 2004 : L. Vincent, G. Neubert, D. Llerena et C. Pellegrin. *Synthèse des approches SCM existantes (livrable 4.1) in Annexe 5 du rapport de 1<sup>ère</sup> année du projet COPILOTES, 47-73 (2004)*.

Zolghadri, 1998 : M. Zolghadri. *Contribution à la modélisation agrégée des systèmes de production discrète*. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, 1998.



---

# Annexe

---

## Annexe

### Résumé du modèle de planification appliqué au centre de décision $s$ du niveau $n$ ( $CD^{n,s}$ )

#### Ensembles

|                   |   |
|-------------------|---|
| $\bar{E}_r$       | Ensemble des entités en amont (ou fournisseurs) de la ressource $r$                         |
| $\underline{E}_r$ | Ensemble des entités en aval (ou clients) de la ressource $r$                               |
| $\bar{P}_r$       | Ensemble des produits entrants (ou composants) de la ressource $r$                          |
| $\vec{P}_r$       | Ensemble des produits sortants (ou « produits finis ») de la ressource $r$                  |
| $P_r$             | Ensemble des produits manipulés par la ressource $r$ ( $P_r = (\bar{P}_r \cup \vec{P}_r)$ ) |
| $\vec{E}$         | Ensemble des clients en relation avec le centre de décision                                 |
| $\bar{E}$         | Ensemble des fournisseurs en relation avec le centre de décision                            |
| $\tilde{E}$       | Ensemble des ressources internes gérées par le centre de décision                           |
| $\hat{E}$         | Ensemble des centres de décision de niveau supérieur au centre de décision considéré        |
| $H$               | Ensemble des périodes définissant l'horizon de planification                                |

#### Indices

|     |   |
|-----|---|
| $r$ | Indice des entités de la chaîne (ressources internes, fournisseurs et clients) en relation avec le centre de décision ( $r \in \bar{E} \cup \tilde{E} \cup \underline{E}$ ) |
| $p$ | Indice des produits ( $p \in \bigcup_{r \in \tilde{E}} P_r$ )   |
| $t$ | Indice des périodes de planification ( $t \in H$ )  |

#### Paramètres

|                  |   |
|------------------|---|
| $K_{r,p,p'}$     | Coefficients de nomenclature (quantité de composants de type $p$ nécessaire pour produire une unité de produit $p'$ dans la ressource $r$ ) |
| $DP_{r,p}$       | Délai de production du produit $p$ sur la ressource $r$   |
| $DL_{r,r'}$      | Délai de livraison de la ressource $r$ à la ressource $r'$  |
| $\alpha_p$       | Quantité de ressource nécessaire pour la production d'un produit $p$  |
| $\beta_p$        | Poids ou volume unitaire d'un produit $p$   |
| $\delta_p$       | Espace nécessaire pour stocker une unité de produit $p$   |
| $CapR_r(t)$      | Capacité de production de la ressource $r$ pendant la période $t$   |
| $CapS_r(t)$      | Capacité de stockage de la ressource $r$ pendant la période $t$   |
| $CapT_{r,r'}(t)$ | Capacité de transport de la ressource $r$ à la ressource $r'$ pendant la période $t$  |
| $PV_{r,p}$       | Prix de vente unitaire du produit $p$ pour le client $r$  |
| $CA_{r,p}$       | Coût moyen d'achat unitaire du composant $p$ chez le fournisseur $r$  |
| $CS_{r,p}$       | Coût moyen de stockage unitaire du produit $p$ à côté de la ressource $r$   |
| $CP_{r,p}$       | Coût moyen de production unitaire du produit $p$ par la ressource $r$   |
| $CR_{r,p}$       | Coût moyen de rupture unitaire du produit $p$ dans la ressource $r$   |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $I0_{r,p}$          | Quantité initiale du stock du produit p associé à la ressource r à la fin de la période 0   |
| $B0_{r,r',p}$       | Quantité de produit p en rupture de stock associé à la ressource r pour son client r' à la fin de la période 0  |
| $F0_{r,p}(t)$       | Quantité de produit p en cours de production dans la ressource r pendant la période t<br>( $1 - DP_{r,p} \leq t \leq 0$ )                             |
| $Q0_{r,r',p}(t)$    | Quantité de composant p en cours de transport d'une entité r vers une entité r' pendant la période t ( $1 \leq t \leq DL_{r,r'}$ )                    |
| $d_{r,r,p}(t)$      | Demande en produit p pour la période t du client r' à la ressource r  |
| $d_{r,r',p}(t)$     | Demande de produits p pour la période t du client r à la ressource r'   |
| $O_{r,p}(t)$        | Ordre de production des centres de décision de niveau supérieur en produit p pour la période t destiné à la ressource interne r                       |
| $C_{r,r',p}(t)$     | Ordre de livraison des centres de décision de niveau supérieur pour la période t pour le fournisseur r livrant la ressource interne r' en composant p |
| $\phi_p, \lambda_p$ | Poids dans le critère donnant plus ou moins d'influence aux ordres de production et de livraison des centres de décision de niveau supérieur.         |

### Variables

|                 |  |
|-----------------|--|
| $i_{r,p}(t)$    | Niveau de stock en produit p associé à la ressource r à la fin de la période t                                 |
| $f_{r,p}(t)$    | Quantité de produit p à lancer en production dans la ressource r en période t                                  |
| $l_{r,r',p}(t)$ | Quantité de produit p à livrer pendant la période t de l'entité r vers l'entité r'                             |
| $q_{r,r',p}(t)$ | Quantité de composant p reçu pendant la période t par l'entité r' depuis l'entité r                            |
| $b_{r,r',p}(t)$ | Quantité de produit p en rupture de stock associé à la ressource r pour son client r' à la fin de la période t |

### Critère d'optimisation

$$\text{Max } C = \text{Max } (C_{\text{gain}} - C_{\text{pénalités}}),$$

où (13)

$$C_{\text{gain}} = \sum_{t \in H} \left[ \sum_{r' \in \bar{E}} \sum_{r \in \bar{E}_r} \sum_{p \in \bar{P}_r} l_{r,r',p}(t) \cdot PV_{r,p} - \sum_{r \in \bar{E}} \sum_{r' \in \bar{E}_r} \sum_{p \in \bar{P}_{r'}} q_{r,r',p}(t) \cdot CA_{r,p} - \sum_{r \in \bar{E}} \left( \sum_{p \in \bar{P}_r} i_{r,p}(t) \cdot CS_{r,p} + \sum_{p \in \bar{P}_r} f_{r,p}(t) \cdot CP_{r,p} \right) - \sum_{r' \in \bar{E}} \sum_{r \in \bar{E}_r} \sum_{p \in \bar{P}_r} b_{r,r',p}(t) \cdot CR_{r,p} \right] \quad (14)$$

$$\text{et } C_{\text{pénalités}} = \sum_{t \in H} \left( \sum_{r' \in \bar{E}_r / r \in \bar{E}} \sum_{p \in \bar{P}_{r'}} \phi_p |f_{r',p}(t) - O_{r',p}(t)| + \sum_{r' \in \bar{E}} \sum_{r \in \bar{E}_r} \sum_{p \in \bar{P}_r} \lambda_p |q_{r',r,p}(t) - C_{r',r,p}(t)| \right) \quad (15)$$

$$i_{r,p}(t) = i_{r,p}(t-1) + f_{r,p}(t - DP_{r,p}) - \sum_{r' \in \vec{E}_r} l_{r,r',p}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (1)$$

$$i_{r,p}(t) = i_{r,p}(t-1) + \sum_{r' \in \vec{E}_r} q_{r',r,p}(t) - \sum_{p' \in \vec{P}_r} (K_{r,p,p'} * f_{r,p'}(t)) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (2)$$

$$b_{r,r',p}(t) = b_{r,r',p}(t-1) + d_{r',r,p}(t) - l_{r,r',p}(t) \quad \forall r' \in \vec{E}, \forall r \in \vec{E}_{r'}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \vec{P}_r} \left( \alpha_p \cdot \sum_{\tau=1}^{DP_{r,p}} f_{r,p}(t - \tau + 1) \right) \leq \text{Cap}R_r(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall t \in H \quad (4)$$

$$\sum_{p \in \vec{P}_r} \delta_p \cdot i_{r,p}(t) \leq \text{Cap}S_r(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall t \in H \quad (5)$$

$$\sum_{p \in \vec{P}_r} \beta_p \cdot l_{r,r',p}(t) \leq \text{Cap}T_{r,r'}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall t \in H \quad (6)$$

$$l_{r,r',p}(t - DL_{r,r'}) = q_{r,r',p}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r \cap \vec{P}_{r'}, \forall t \in H \quad (7)$$

$$q_{r,r',p}(t), i_{r,p}(t), f_{r,p}(t), b_{r,r',p}(t), l_{r,r',p}(t) \geq 0 \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in H \quad (8)$$

$$i_{r,p,0} = IO_{r,p} \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r \quad (9)$$

$$b_{r,r',p,0} = BO_{r,r',p} \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r \quad (10)$$

$$f_{r,p}(t) = FO_{r,p}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in \{1 - DP_{r,p}, \dots, 0\} \quad (11)$$

$$q_{r',r,p}(t) = QO_{r',r,p}(t) \quad \forall r \in \vec{E}, \forall r' \in \vec{E}_r, \forall p \in \vec{P}_r, \forall t \in \{1, \dots, DL_{r',r}\} \quad (12)$$