



**HAL**  
open science

# Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique

Hassen Gharbi

► **To cite this version:**

Hassen Gharbi. Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique. Recherche opérationnelle [math.OA]. INSA de Toulouse, 2012. Français. NNT: . tel-00782594

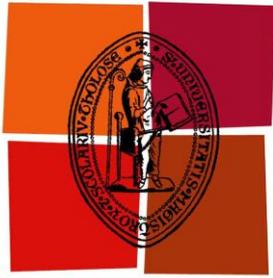
**HAL Id: tel-00782594**

**<https://theses.hal.science/tel-00782594>**

Submitted on 30 Jan 2013

**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.



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*  
Discipline ou spécialité : *Informatique et Génie Industriel*

---

Présentée et soutenue par *Hassen GHARBI*  
Le 10 Novembre 2012

Titre : *Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique*

---

### JURY

*M. Riadh ROBBANA Professeur (INSAT-Tunis, Tunisie), Président*  
*M. Khaled GHEDIRA Professeur (ISG-Tunis, Tunisie), Rapporteur*  
*M. Samir LAMOURI Professeur (ENSAM-Paris, France), Rapporteur*  
*M. Alain GUINET Professeur (INSA-Lyon, France), Membre*  
*M. Gérard FONTAN Professeur (INP-Toulouse, France), Invité*  
*Mme. Colette Mercé Professeur (INSA-Toulouse, France), Directeur de thèse*  
*M. Mohamed MOALLA Professeur (FS-Tunis, Tunisie), co-Directeur de thèse*

---

**Ecole doctorale :** *Systèmes*  
**Unité de recherche :** *MOGISA LAAS-CNRS*  
**Directeur(s) de Thèse :**  
**Rapporteurs :**



# Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire s'est déroulé dans le cadre d'une convention de cotutelle de thèse entre la Faculté des Sciences de Tunis (FST), d'une part, et l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA) et le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS, d'autre part. Je remercie Messieurs Malik Ghallab, Raja Chatila et Jean Arlat, directeurs successifs du LAAS de m'avoir accueilli dans ce laboratoire. Je remercie également Messieurs Pierre Lopez, chargé de recherche et Christian Artigues Directeur de recherche au CNRS de m'avoir accueilli et facilité mes séjours au sein du groupe Modélisation, Optimisation et Gestion Intégrée des Systèmes d'Activités (MOGISA) dont ils ont eu la responsabilité.

Je tiens à remercier particulièrement et à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mes encadreurs de thèse Colette Mercé, Gérard Fontan et Mohamed Moalla. Leur dévouement, leur sympathie, leur constante bonne humeur, leur disponibilité tout au long de la réalisation de la thèse, leur confiance, leurs conseils et leurs critiques m'ont permis de mener à bien ces travaux. Je ne saurais jamais assez les remercier de leurs encouragements dans les moments difficiles, de leur soutien et de leur relecture minutieuse et attentive de mon manuscrit de thèse presque toujours dans des délais serrés.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail de thèse : Messieurs Khaled Ghédira, Professeur à l'Institut Supérieur de Gestion de Tunis et Samir Lamouri, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers à Paris en leur qualité de rapporteurs, Monsieur Riadh Robbana, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie de Tunis, en sa qualité de président de jury et Monsieur Alain Guinet, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, en sa qualité d'examineur.

Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues et mes amis du groupe MOGISA au LAAS et ceux du laboratoire LIP2 à la Faculté des Sciences de Tunis qui ont contribué à rendre ce travail de thèse très agréable : Kamel, Bilel, Mounira, Fernando, Romaric, Panwadé, Kata, Boadou, Bernat, Fallou, Mariem.

J'adresse une pensée particulière à Ines, mon épouse, pour sa patience, son soutien sans limite et ses conseils précieux qui ont su créer un climat adorable sans lequel ce travail n'aurait jamais pu être achevé.

Enfin, je ne terminerai pas sans avoir exprimé toute ma gratitude à ma famille qui a consenti beaucoup de sacrifices à mon éducation et qui a pleinement contribué à la réussite de ce travail.



# Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	<b>1</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>3</b>
<b>Liste Des Figures</b> .....	<b>8</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapitre I Evolution des approches et objectifs d'organisation et de conduite des systèmes de production actuels</b> .....	<b>15</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Evolution des systèmes de production</b> .....	<b>15</b>
1.1 <i>Système de production</i> .....	15
1.2 <i>Les changements dans l'environnement technico-socio-économique depuis les années 90</i> .....	16
1.2.1 Les changements dans l'environnement économique.....	16
1.2.2 Les changements dans l'environnement technologique et social.....	17
<b>2 Les objectifs majeurs des systèmes de production modernes</b> .....	<b>18</b>
2.1 <i>Réduire le temps de réponse aux commandes des clients</i> .....	18
2.2 <i>Améliorer la qualité et réduire les coûts</i> .....	19
2.3 <i>Améliorer la visibilité</i> .....	19
<b>3 La gestion de la production</b> .....	<b>20</b>
3.1 <i>Caractérisation du système de gestion de la production</i> .....	20
3.2 <i>Les problématiques de la gestion de la production</i> .....	20
3.3 <i>Les niveaux de décision en gestion de production</i> .....	21
3.4 <i>Offres en logiciels pour la gestion de la production</i> .....	22
3.4.1 Les outils classiques de GPAO .....	22
3.4.2 Les ERP .....	23
3.4.3 Les MES.....	23
<b>4 Approches classiques pour la planification de la production</b> .....	<b>23</b>
4.1 <i>La méthode MRP II</i> .....	24
4.1.1 Principes du MRP .....	24
4.1.2 Structure décisionnelle hiérarchique de la planification MRP II .....	24
4.1.3 Le Plan Industriel et Commercial.....	25

4.1.4	Le Programme Directeur de Production.....	25
4.2	<i>L'approche du Juste-à-temps</i> .....	26
4.2.1	La méthode KANBAN .....	26
<b>5</b>	<b>Le recours à la modélisation et à l'analyse des systèmes de production ...</b>	<b>27</b>
5.1	<i>Les approches de modélisation et d'analyse</i> .....	27
5.1.1	L'approche analytique .....	27
5.1.2	L'approche par simulation.....	28
5.2	<i>Exemples d'outils logiciels de simulation et de résolution de modèles analytiques</i>	29
5.2.1	Quelques outils de simulation.....	29
5.2.2	Quelques outils de résolution de modèles analytiques. ....	29
<b>6</b>	<b>Les nouvelles structurations des entreprises manufacturières : les chaînes</b>	
<b>logistiques</b>	.....	<b>30</b>
6.1	<i>Emergence des relations de partenariat</i> .....	30
6.2	<i>Fondements des chaînes logistiques</i> .....	31
6.2.1	Définitions .....	31
6.2.2	Typologie de chaînes logistiques .....	33
6.2.3	Réseaux d'entreprises et chaînes logistiques .....	34
6.3	<i>La gestion des chaînes logistiques</i> .....	35
6.3.1	Définitions .....	35
6.3.2	Niveaux décisionnels pour la gestion des chaînes logistiques (SCM).....	37
6.3.3	Offre logicielle dédiée au SCM .....	38
	<b>Conclusion</b> .....	<b>39</b>
	<b>Chapitre II Fondements d'une planification réactive et robuste au sein d'une</b>	
	<b>chaîne logistique</b> .....	<b>43</b>
	<b>Introduction</b> .....	<b>43</b>
<b>1.</b>	<b>Revue des approches de planification tactique des chaînes logistique ....</b>	<b>43</b>
1.1.	<i>Les approches centralisées</i> .....	45
1.2.	<i>Les approches distribuées</i> .....	46
1.3.	<i>Les approches hiérarchisées ou mixtes</i> .....	47
<b>2.</b>	<b>Risque, incertitude et perturbation dans la planification des chaînes</b>	
<b>logistiques</b>	.....	<b>49</b>
2.1.	<i>Définitions</i> .....	50
2.2.	<i>Typologie des risques et incertitudes dans les chaînes logistiques</i> .....	52
2.3.	<i>Modélisation de l'incertitude en planification des chaînes logistiques.</i> .....	54
<b>3.</b>	<b>Planification réactive et robuste : éléments de problématique</b> .....	<b>57</b>
3.1.	<i>La notion de réactivité</i> .....	57
3.1.1.	Définitions .....	57

3.1.2.	Pratiques classiques pour favoriser la réactivité .....	58
3.2.	<i>La notion de robustesse</i> .....	59
3.2.1.	Définitions .....	59
3.2.2.	Approches pour favoriser la robustesse de la planification.....	61
3.3.	<i>Approche décisionnelle à deux niveaux pour la planification réactive et robuste</i> 65	
3.3.1.	Description et caractéristiques de la structure décisionnelle proposée.....	65
3.3.2.	Éléments de mesure de performance.....	67
<b>Conclusion</b> .....		<b>69</b>
<b>Chapitre III Planification dynamique réactive : Concepts et Modèles</b> .....		<b>71</b>
<b>Introduction</b> .....		<b>71</b>
<b>1 Contexte de l'étude et analyse décisionnelle</b> .....		<b>71</b>
1.1	<i>Proposition d'une structure élémentaire d'une chaîne logistique</i> .....	71
1.2	<i>Analyse fine du processus décisionnel</i> .....	73
1.2.1	Caractéristiques générales de prise de décision dans l'environnement industriel	73
1.2.2	Phases du processus décisionnel.....	74
1.2.3	Formalisation du processus décisionnel .....	74
<b>2 Processus dynamique de planification</b> .....		<b>75</b>
2.1	<i>Planification à horizon glissant</i> .....	76
2.2	<i>Modélisation mathématique du processus dynamique de planification</i> .....	79
2.2.1	Données statiques (indépendantes de l'étape s) .....	79
2.2.2	Données dynamiques (mises à jour à chaque étape s).....	81
2.2.3	Variables décisionnelles définies à chaque étape s :.....	81
2.2.4	Etat réel des décisions déjà prises au début de chaque étape s :.....	83
2.2.5	Contraintes .....	84
<b>3 Simulation du processus dynamique de planification dans un contexte incertain</b> .....		<b>89</b>
3.1	<i>Fonctionnement de l'outil de simulation</i> .....	89
3.2	<i>Expérimentation et analyse de résultats</i> .....	90
3.2.1	Caractéristiques de l'exemple de production considéré.....	91
3.2.2	Evolution de la demande client.....	92
3.2.3	Description du déroulement de la simulation .....	96
3.2.4	Résultats de la simulation.....	99
<b>Conclusion</b> .....		<b>107</b>
<b>Chapitre IV Mise en œuvre de la structure décisionnelle hiérarchisée</b> .....		<b>109</b>
<b>Introduction</b> .....		<b>109</b>
<b>1 Le niveau supérieur de décision</b> .....		<b>109</b>

1.1	<i>Eléments caractéristiques du niveau supérieur de planification.....</i>	109
1.1.1	Agrégation du temps.....	109
1.1.2	Relations temporelles entre niveau supérieur et niveau inférieur.....	111
<b>2</b>	<b>Modèle mathématique de décision du niveau agrégé .....</b>	<b>112</b>
2.1	<i>Modélisation mathématique du processus de la planification agrégée .....</i>	<i>112</i>
2.1.1	Données détaillées et données agrégées .....	112
2.1.2	Variables décisionnelles agrégées.....	113
2.1.3	Relations d'agrégation entre données.....	114
2.1.4	Contraintes.....	116
2.1.5	La fonction objectif.....	116
2.2	<i>Modélisation des interactions entre décisions agrégées.....</i>	<i>117</i>
2.2.1	Relations entre décisions détaillées et décisions agrégées .....	117
2.2.2	Conditions élémentaires entre décisions agrégées .....	118
2.2.3	Analyse de l'influence des délais temporels détaillés pour sa prise en compte au niveau agrégé .....	118
2.2.4	Contraintes de prise en compte de l'effet des délais temporels au niveau agrégé	122
<b>3</b>	<b>Le plan de guidage .....</b>	<b>123</b>
3.1	<i>Guidage budgétaire.....</i>	<i>123</i>
3.1.1	Caractéristiques du guidage budgétaire .....	123
3.1.2	Intégration des contraintes du guidage budgétaire au niveau détaillé.....	125
3.2	<i>Le guidage par la sous-traitance agrégée.....</i>	<i>127</i>
3.2.1	Caractéristiques du guidage par la sous-traitance agrégée.....	127
3.2.2	Intégration des contraintes de guidage par la sous-traitance au niveau détaillé	128
	<b>Conclusion .....</b>	<b>129</b>
	<b>Chapitre V Simulation et expérimentation numérique de la structure décisionnelle hiérarchisée .....</b>	<b>131</b>
	<b>Introduction.....</b>	<b>131</b>
<b>1</b>	<b>Outil de simulation .....</b>	<b>131</b>
1.1	<i>Présentation de l'outil de simulation de la structure décisionnelle .....</i>	<i>132</i>
1.2	<i>Mise en œuvre de l'outil de simulation.....</i>	<i>134</i>
<b>2</b>	<b>Etude de la performance : Les indicateurs .....</b>	<b>135</b>
2.1	<i>Concepts et démarche générale d'expérimentation .....</i>	<i>135</i>
2.2	<i>Le taux de service .....</i>	<i>138</i>
2.2.1	Le taux de service détaillé.....	138
2.2.2	Le taux de service globalisé.....	138
2.2.3	Le taux de service agrégé .....	138
2.3	<i>Les indicateurs économiques .....</i>	<i>139</i>
2.3.1	Le coût total.....	139

2.3.2	Le coût de production (CP) et le coût de production interne (CPI) .....	139
2.3.3	La sous-traitance.....	139
2.4	<i>Les indicateurs de qualité de réactivité.....</i>	<i>140</i>
2.4.1	Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production IQCP .	140
2.4.2	Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production interne IQCP	140
2.4.3	Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis de la sous-traitance IQST .....	141
2.5	<i>Les indicateurs de robustesse .....</i>	<i>141</i>
2.5.1	Indicateurs de robustesse du coût total.....	141
2.5.2	Indicateurs de robustesse du coût de production.....	141
2.5.3	Indicateurs de robustesse du coût de production interne .....	142
2.5.4	Indicateurs de robustesse de la sous-traitance .....	142
<b>3</b>	<b>Caractéristiques du problème traité .....</b>	<b>143</b>
3.1	<i>Les caractéristiques physiques.....</i>	<i>143</i>
3.1.1	Les caractéristiques temporelles.....	144
3.1.2	Les coûts unitaires.....	144
<b>4</b>	<b>Expérimentation pour valider le modèle agrégé MA. ....</b>	<b>145</b>
4.1	<i>Principe et déroulement de l'expérimentation.....</i>	<i>145</i>
4.2	<i>Demande agrégée et demande détaillée.....</i>	<i>147</i>
4.3	<i>Résultats numériques de l'expérimentation : Plans agrégés PA(MA) et PA(MAC)</i> <i>148</i>	
<b>5</b>	<b>Expérimentation dans le cas d'une demande agrégée certaine .....</b>	<b>150</b>
5.1	<i>Demande agrégée et profils détaillés .....</i>	<i>150</i>
5.2	<i>Description du déroulement de l'expérimentation .....</i>	<i>153</i>
5.3	<i>Résultats de l'expérimentation.....</i>	<i>153</i>
5.4	<i>Analyse des résultats.....</i>	<i>157</i>
<b>6</b>	<b>Expérimentation avec une demande agrégée incertaine.....</b>	<b>160</b>
6.1	<i>Demande agrégée incertaine et profils détaillés réels.....</i>	<i>160</i>
6.2	<i>Résultats de l'expérimentation.....</i>	<i>163</i>
6.3	<i>Analyse des résultats.....</i>	<i>165</i>
	<b>Conclusion .....</b>	<b>167</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>169</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>173</b>

# Liste Des Figures

Figure I-1 Phases de la simulation (extrait du cours de Jean-Louis Boimond, Université d'Angers ISTIA) .....	28
Figure I-2 Cinq structures typiques de la chaîne logistique .....	33
Figure II-1 Supply Chain Planning Matrix [Stadtler et al., 05] .....	44
Figure II-2 Structure décisionnelle à deux niveaux .....	65
Figure III-1 Structure de la chaîne logistique étudiée .....	72
Figure III-2 Formalisation des phases du processus décisionnel .....	75
Figure III-3 Planification à horizon glissant avec périodicité de planification égale à une période .....	76
Figure III-4 Planification à horizon gelé [Mercé, 87] .....	77
Figure III-5 Planification à horizon glissant rétrécissant .....	78
Figure III-6 Intervalles de calcul du coût global .....	88
Figure III-7 Fonctionnement général de l'outil de simulation .....	90
Figure III-8 Nomenclatures des produits P1, P2 et P3 .....	91
Figure III-9 Décomposition de l'horizon de la demande client .....	93
Figure III-10 Positionnement de la charge globale initiale par rapport aux capacités cumulées .....	96
Figure III-11 Fonctionnement général d'une planification à horizon glissant en adoptant un Horizon Gelé de deux périodes Gelé .....	97
Figure III-12 Positionnement de la charge globale de production du problème traité et de la demande réelle .....	99
Figure III-13 Comparaison des arriérés de production de P1 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	101
Figure III-14 Comparaison des arriérés de production de P2 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	101
Figure III-15 Comparaison des arriérés de production de P3 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	102
Figure III-16 Evolution du stock du produit P1 selon les différentes approches .....	103
Figure III-17 Evolution du stock de P2 selon les différentes approches .....	104
Figure III-18 Evolution du stock de P3 selon les différentes approches .....	104
Figure III-19 Comparaison du taux de service par période de P1 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	105
Figure III-20 Comparaison du taux de service par période de P2 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	106

Figure III-21 Comparaison du taux de service par période de P3 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G) .....	106
Figure III-22 Engagement d'heures supplémentaires selon les deux approches .....	107
Figure IV-1 Regroupement de k périodes élémentaires en une macro-période .....	110
Figure IV-2 Correspondance entre macro-périodes et périodes détaillées .....	111
Figure IV-3 Relation entre décisions détaillées et décision agrégée dans le cas idéal .....	117
Figure IV-4 Imputation des décisions détaillées dans les décisions agrégées.....	119
Figure IV-5 Suivi dynamique détaillé du budget agrégé de guidage.....	127
Figure IV-6 Suivi dynamique détaillé du guidage par sous-traitance agrégée.....	128
Figure V-1 Fonctionnement général de l'outil de simulation de la structure hiérarchisée...	133
Figure V-2 Paramètres de notre outil de simulation .....	134
Figure V-3 Exemple de globalisation du coût total réel détaillé .....	136
Figure V-4 Illustration de la démarche générale d'expérimentation adoptée dans ce travail	137
Figure V-5 Nomenclatures de P1 et P2 .....	143
Figure V-6 Illustration de la démarche d'expérimentation avec une variation du modèle agrégé adopté .....	146
Figure V-7 Profil de la demande détaillée .....	147
Figure V-8 Profil 1 de la demande détaillée.....	151
Figure V-9 Profil 2 de la demande détaillée.....	152
Figure V-10 Profil 3 de la demande détaillée.....	153
Figure V-11 Description du déroulement de l'expérimentation dans le cas d'une demande agrégée certaine.....	154
Figure V-12 Profil 1 de la demande détaillée.....	161
Figure V-13 Profil 2 de la demande détaillée.....	162
Figure V-14 Profil 3 de la demande détaillée.....	163



# Introduction générale

A partir des années 90, un contexte économique nouveau s'est installé progressivement, induisant des changements dans la gestion industrielle des entreprises manufacturières. La concurrence mondialisée et les marchés ouverts ont, en effet, intensifié la compétition entre les entreprises manufacturières. D'un autre côté, les comportements de consommation des clients sont devenus fluctuants et difficiles à prévoir, d'où une mauvaise visibilité des ventes. De là, les entreprises sont constamment confrontées à la nécessité de s'adapter au marché tout en maîtrisant le coût, la qualité et le délai de fabrication des produits offerts.

La tendance générale pour les systèmes de production de biens et de services a été de chercher à accroître leurs compétences par le biais du recentrage métier et de s'organiser en réseaux d'entreprises partenaires pour externaliser leurs activités secondaires, finaliser leur production, développer une meilleure qualité de service à leurs clients, tendre les flux et partager les risques.

Toutefois, cette tendance a conduit à une complexification progressive de la gestion des flux d'information et de matières entre les entreprises partenaires, due à la distribution géographique des activités tout au long de la chaîne logistique (approvisionnement, production, transport, distribution, vente), aux interconnexions entre sites n'appartenant pas forcément à une même entité juridique, aux relations à la fois concurrentielles et collaboratives des entités de la chaîne, etc.

La difficulté à assurer un pilotage efficace de ce type d'organisation réticulaire est augmentée par l'incertitude qui caractérise bon nombre de données fondamentales telles que les demandes clients, les ressources mises à disposition de la chaîne par chaque entité et les délais de production ou d'approvisionnement. Enfin, les entités qui constituent une chaîne sont soumises à des perturbations et aléas divers qui génèrent des écarts entre leur évolution prévue et l'état réel.

Ainsi, il ne suffit pas d'avoir des plans qui optimisent les critères financiers et le taux de service. Ces plans doivent être réactifs et robustes, c'est-à-dire peu sensibles aux incertitudes et capables de faire face aux perturbations et aux aléas qui touchent les systèmes de production et la prise de décision.

C'est dans ce contexte de la planification tactique de chaîne logistique, dans un environnement incertain, que s'insèrent nos travaux de thèse. Notre objectif est de proposer une approche qui assure une planification optimale vis-à-vis de critères financiers tout en étant dotée de mécanismes permettant la réactivité face aux incertitudes, aux perturbations et aux aléas.

Nous considérons le cas d'un maillon d'une chaîne logistique se présentant comme une structure générique construite autour d'une entité jouant le rôle de producteur principal et collaborant avec ses partenaires à travers des relations « point à point ». Nous nous focalisons sur le problème de planification de la production de cette entité en

intégrant ses relations directes avec ses clients, ses sous-traitants et ses fournisseurs. Dans ce cadre, le producteur doit satisfaire les demandes de ses clients au moindre coût.

Nous développons une approche hiérarchisée à deux niveaux décisionnels pour planifier à moyen terme la production de l'entité considérée. Le niveau supérieur adopte une vision agrégée (agrégation temporelle) du problème de planification et du système de décision pour générer un plan de production optimal vis-à-vis du coût total de production. Il transmet des consignes au niveau inférieur sous forme d'un "plan de guidage". Le niveau inférieur se préoccupe de gérer un processus dynamique de planification à horizon glissant qui vise à suivre au mieux les consignes transmises par le niveau agrégé tout en permettant de faire face aux incertitudes et perturbations éventuelles. Ledit plan de guidage renferme des grandeurs agrégées par macro-périodes d'activité. Nous avons conçu et expérimenté trois variantes de tels plans en limitant les grandeurs agrégées à des coûts ou des consignes/contraintes de planification d'activités.

Notre contribution traite en profondeur la modélisation de la planification à chacun des deux niveaux en utilisant la programmation linéaire :

- Au premier niveau, la modélisation intègre, en plus de l'agrégation temporelle classique, une agrégation des délais temporels auxquels la décision au niveau détaillé est assujettie et ce, en vue de consolider ses fondements et de renforcer sa robustesse ;
- Le niveau détaillé se base sur une analyse fine de l'inertie du processus décisionnel (délais d'anticipation) et du système de production (délais de réalisation).

La qualité de l'approche est analysée à travers les résultats de simulations numériques effectuées à l'aide d'un programme logiciel développé à cet effet. Des indicateurs de performance sont proposés en vue de quantifier les apports en termes de réactivité et de robustesse.

Le mémoire comporte cinq chapitres :

- Le premier chapitre rappelle l'évolution des systèmes de production en relation avec les changements des environnements économique, technique et social. Il synthétise les défis majeurs auxquels les systèmes de production d'aujourd'hui doivent faire face et aborde la problématique de la planification et de la gestion de la production. L'approche par la modélisation et la simulation est introduite comme un outil d'analyse des systèmes de production. Enfin, nous retraçons les nouvelles structurations des entreprises manufacturières ayant abouti au développement des chaînes logistiques.

- Le deuxième chapitre expose les fondements d'une planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique. Nous commençons par passer en revue les différentes approches de planification tactique des chaînes logistiques. Nous introduisons ensuite les aspects d'incertitude et de perturbation et leur prise en compte dans la planification des chaînes logistiques. Nous posons alors la problématique de la planification réactive et robuste et nous introduisons les caractéristiques d'une structure décisionnelle hiérarchisée à deux niveaux que nous proposons comme approche pour la résolution du problème posé. Nous évoquons, en dernier lieu, les éléments de mesure de

performance qui permettent de constituer des indicateurs d'appréciation de la qualité d'une approche de planification donnée.

- Le troisième chapitre entre dans le fond des travaux de cette thèse. Nous nous intéressons au deuxième niveau de la structure décisionnelle introduite précédemment et nous étudions, de façon particulière, la problématique de la planification tactique des activités d'une entité de production au sein d'un maillon d'une structure générique dans une chaîne logistique ; les interactions de l'entité de production avec ses partenaires étant supposées de type point-à-point. Un processus dynamique de planification à horizon glissant, s'appuyant sur une modélisation fine du processus décisionnel, est proposé comme base à la construction d'une planification tactique réactive. La modélisation mathématique de ce processus et sa résolution par le biais de la simulation sont étudiées.

- Le quatrième chapitre étudie le niveau supérieur de décision. Il définit la modélisation mathématique du processus de planification agrégée. Par rapport aux démarches classiques, cette modélisation mathématique intègre la prise en compte des délais temporels du niveau inférieur dans le but d'améliorer la robustesse de la planification agrégée. La suite du chapitre porte sur le développement du concept de plan de guidage servant d'articulation entre les deux niveaux de décision. Trois variantes sont considérées. Leur originalité se situe dans le fait qu'elles sont choisies pour être suffisamment consistantes dans leur apport au guidage du niveau détaillé tout en préservant à ce dernier une large autonomie décisionnelle.

- Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la simulation et expérimentation numérique de la structure décisionnelle hiérarchisée proposée. Les caractéristiques du problème de la planification tactique sont synthétisées puis sont listés les différents indicateurs de performance pouvant servir dans l'appréciation des qualités de l'approche de planification à deux niveaux proposée. Les résultats de deux familles d'expérimentations sont rapportés ; la première famille vise la validation du modèle agrégé, tandis que la deuxième famille vise l'évaluation des performances dans le cas d'une demande agrégée certaine et dans le cas d'une demande agrégée incertaine.

Une conclusion générale récapitule les contributions développées dans les travaux de cette thèse, en synthétise les apports et les limites et en projette certaines perspectives de prolongement.



# ***Chapitre I***

## **Evolution des approches et objectifs d'organisation et de conduite des systèmes de production actuels**

### **Introduction**

Ce premier chapitre a pour objectif de positionner notre travail de thèse dans le contexte des nouvelles tendances des systèmes de production et des chaînes logistiques ainsi que dans les problématiques de leur gestion.

La structure du chapitre se présente comme suit : Les deux premières parties retracent l'évolution des systèmes de production et leurs nouveaux enjeux compte tenu des changements de l'environnement économique, technique et social. La troisième partie présente d'une manière générale les aspects relatifs à la gestion de la production au niveau de l'entreprise manufacturière. Les approches classiques de la planification de la production font l'objet de la quatrième partie et sont suivies, dans la cinquième partie, d'une présentation des méthodes utilisées pour la modélisation et la simulation des systèmes de production. La sixième et dernière partie, aborde les nouvelles formes de structures en réseaux des entreprises manufacturières que sont les chaînes logistiques. Cette partie comporte une synthèse des définitions relatives aux notions de chaîne logistique et de gestion des chaînes logistiques ou Supply Chain Management(SCM). Elle donne également une vue générale sur le système décisionnel relatif au SCM.

## **1 Evolution des systèmes de production**

Avant de présenter les profonds changements qui ont marqué l'évolution de l'environnement technique, économique et social dans lequel exercent les entreprises manufacturières, nous avons jugé nécessaire de rappeler la définition de quelques notions se rapportant aux systèmes de production.

### **1.1 Système de production**

La notion de « système » a été définie par plusieurs auteurs dans la littérature scientifique, chacun selon le contexte, le point de vue et le niveau de détail dans lesquels il se place. Ainsi, Bertalanffy caractérise un système comme « *un ensemble d'éléments en interaction* » [Bertalanffy, 68]. Dans son côté, Sénéchal considère le système de production comme étant :

*« Une catégorie particulière de système :*

- *constitué par un ensemble de ressources humaines, techniques et financières,*
- *placé dans un environnement naturel, économique, social et politique,*
- *fonctionnant pour sa propre pérennité, le bien de ses membres, de ses utilisateurs, de la société en général,*
- *réalisant des produits matériels (biens) ou immatériels (services),*
- *mettant en œuvre différents processus (de conception, de production, de gestion, de commercialisation, etc.),*
- *et dont la composition (équipements, effectifs, etc.), l'organisation, et les activités (innovations, externalisations, etc.) évoluent.* » [Sénéchal, 04]

Cette dernière définition, plus ciblée et plus détaillée, souligne, tout d'abord, la complexité des systèmes de production compte tenu des éléments de natures différentes qui les composent ainsi que les différents processus qui y sont mis en œuvre. Ensuite, elle considère un système fournissant des services comme étant un système de production. Enfin, elle met en relief le caractère évolutif de ces systèmes tout en les liant à l'environnement économique, social et politique dans lesquels ils sont placés. Plus récemment, Dolgui et Proth ont défini un système de production comme étant « *l'ensemble des moyens déployés pour satisfaire un client, depuis l'enregistrement d'une commande jusqu'à sa livraison et l'encaissement de la facture correspondante* » [Dolgui et al., 06]. Selon les deux auteurs, un système de production n'est pas restreint à ce qu'ils appellent le « *système de fabrication* » composé seulement par « *l'ensemble des ressources requises pour fabriquer un produit ou un ensemble donné de produits* » [Dolgui et al., 06]. Ils adoptent une vision plus vaste de la notion du système de production en incluant les interfaces qui lient le système de fabrication aux services commerciaux, de livraison et après-vente et ceci pour satisfaire au mieux le client.

Notre travail de thèse s'intéresse plus aux systèmes de production de biens qu'à ceux de production de services. Généralement, les entreprises produisant des biens sont considérées comme des entreprises œuvrant dans un contexte industriel manufacturier et sont, de fait, désignées par entreprises manufacturières. Dans le paragraphe suivant, nous détaillons les changements qui ont concerné plus particulièrement l'environnement économique, technique et social des entreprises manufacturières. Ces changements ont été à l'origine des profondes évolutions subies par les systèmes de production.

## **1.2 Les changements dans l'environnement technico-socio-économique depuis les années 90**

### **1.2.1 Les changements dans l'environnement économique**

Au cours des deux dernières décennies, l'économie internationale a subi des mutations profondes touchant essentiellement l'internationalisation des échanges commerciaux et l'ouverture des marchés nationaux. L'offre est devenue largement excédentaire devant une demande qui se caractérise par l'incertitude et la fluctuation. Pour faire face à un environnement économique de ce type, les entreprises ont été contraintes de

« bouleverser » leurs philosophies de management, leurs règles de comportement, leurs méthodes d'organisation et leurs modes de relations inter-entreprises [Cohendet et al. 90]. D'abord, les entreprises ont été conduites à optimiser leur production tout en assurant une hausse de la valeur ajoutée de leurs produits envers leurs clients et en adoptant le concept de la « production au plus juste » (lean manufacturing). Leur capacité à répondre rapidement aux sollicitations externes et internes est devenue un élément clé de leur compétitivité. C'est ainsi que la réactivité s'est imposée à la base des nouvelles organisations et des systèmes de production modernes. Enfin, pour assurer leur survie sur le marché, les entreprises sont entrées dans un mode de relations basé sur la coopération, aussi bien avec leurs clients qu'avec leurs fournisseurs.

### **1.2.2 Les changements dans l'environnement technologique et social**

L'évolution de l'environnement économique a progressé, parallèlement, avec l'éclosion de nouvelles technologies qui ont contribué à changer l'organisation et les modes de fonctionnement de l'entreprise manufacturière et des systèmes de production. De façon générale, les plus importants domaines du progrès technologique concernent :

- les moyens de transport : l'évolution importante qu'ont subie les moyens de transport les rendent de plus en plus performants et économiques,
- les moyens de production : le progrès a touché les ressources de production, les procédés de fabrication, les matériaux ainsi que les outils d'aide à la production,
- les nouvelles technologies de l'information et de la communication : les systèmes de communication, eux aussi, ne sont pas à l'écart du progrès et de l'innovation technologique. L'information en elle-même est devenue ainsi un enjeu stratégique que l'entreprise peut gérer facilement à l'aide des nouvelles technologies d'information et de communication,

L'entreprise s'est dessinée comme une forme de système social, car il y existe un ensemble de relations qui lient les salariés d'une part avec leur travail et d'autre part avec leurs employeurs.

La nature des tâches à effectuer par les travailleurs a aussi beaucoup changé. En premier lieu, l'effort physique déployé par les employés a diminué considérablement grâce à l'automatisation et la robotisation. Il fallait, cependant, augmenter les tâches de surveillance et de supervision. En second lieu, la parcellisation des tâches, qui est l'un des principes du taylorisme, a laissé le travailleur totalement enfermé dans l'exécution d'une tâche bien spécifique tout au long de sa vie professionnelle. Cette réalité a changé vers une grande mobilité des travailleurs. En effet, ces derniers ne sont plus cantonnés à un même emploi. L'entreprise les aide toujours à acquérir de nouvelles compétences et de s'adapter à l'évolution de l'environnement technologique et économique en leur programmant des sessions de formation professionnelle. D'où, une plus forte adaptation des opérateurs à la variation de la charge de travail, et, donc, une réactivité accrue.

## 2 Les objectifs majeurs des systèmes de production modernes

Dans cette section, nous détaillons les objectifs que doivent atteindre les systèmes de production modernes pour faire face aux nouvelles caractéristiques de l'environnement économique, technologique et social. Ces objectifs sont traduits sous forme d'un ensemble d'enjeux que le système de production doit prendre en compte. Nous évoquons, ici, les enjeux majeurs et les solutions envisagées.

### 2.1 Réduire le temps de réponse aux commandes des clients

Dans un contexte de concurrence mondiale, assurer une solide relation avec le client passe notamment par une réponse rapide à sa commande. La rapidité de réponse est envisagée dans toutes les activités, aussi bien au niveau de la conception de nouveaux produits qu'au niveau du processus de fabrication du produit.

Au niveau de la conception, l'utilisation de l'ingénierie simultanée, connue sous le terme anglais «concurrent engineering» [Pokojski et al., 10], se caractérise par la possibilité de mener les différentes opérations nécessaires à cette conception d'une façon plutôt parallèle que séquentielle, ce qui permet de réduire le temps de développement d'un nouveau produit.

Au niveau de la production, plusieurs orientations de solutions ont été appliquées en vue d'optimiser les durées des différentes activités (une liste exhaustive est donnée dans l'ouvrage de Dolgui et al. [Dolgui et al., 06] ). Dans ce qui suit, nous présentons les principales solutions envisagées dans les trois grands processus qui composent la phase de production, à savoir, l'approvisionnement, la fabrication et la distribution.

- L'approvisionnement : l'une des premières solutions appliquées pour réduire la durée de cette activité était de maintenir des stocks de composants et/ou de matières premières. Cependant, cette solution s'est avérée de plus en plus coûteuse et risquée (rupture de stock, composants obsolètes, etc.) face à une concurrence de plus en plus importante. Les entreprises se sont orientées alors vers le développement de relations de partenariat avec leurs fournisseurs afin d'organiser au plus juste leurs approvisionnements tout en minimisant les risques liés aux ruptures des stocks.
- La fabrication : plusieurs facteurs interviennent dans la détermination de la longueur du cycle de fabrication du produit. Dans ce contexte, nous rappelons que la notion de cycle de fabrication désigne « *le temps qui sépare l'entrée des matières premières qui arrivent du fournisseur, de la sortie des produits finis qui vont chez le client* » [Baglin et al. 96]. Afin de diminuer ce cycle de fabrication, plusieurs pratiques peuvent être mises en œuvre. Déjà, dès l'implantation du système de production, un choix intelligent de l'organisation des postes de travail et du montage permet d'assurer une plus grande fluidité des produits. En deuxième lieu, l'équilibrage des charges entre les différentes ressources, tout au long de la chaîne de production (ou d'assemblage), a pour conséquence directe la minimisation du temps total de

séjour des en-cours dans la chaîne. Enfin, la mise en œuvre de stratégies appropriées pour l'ordonnancement des tâches de production sur les différentes ressources contribue profondément à maîtriser le cycle de fabrication.

- La distribution : la réduction du délai de livraison participe également à la réduction du délai total de réponse à une demande du client. Dans cette optique, les entreprises accordent une importance de plus en plus croissante à la conception de leurs réseaux de distribution et à leur reconfiguration afin d'optimiser au mieux les temps de livraison.

## **2.2 Améliorer la qualité et réduire les coûts**

Dans une conjoncture économique où le client est considéré comme un « roi », la notion de qualité représente l'un des facteurs clés qui assurent la viabilité de l'entreprise manufacturière.

La qualité couvre divers aspects du processus de production. Un de ces aspects, le plus apparent, est le degré de conformité (ou d'adaptation) du produit avec les spécifications fournies par le bureau d'études ou établies par le client dans un cahier des charges.

En se référant aux aspects marchands, la compétitivité de l'entreprise manufacturière est classiquement mesurée par la rentabilité des produits qu'elle fabrique et vend. Ainsi, pour garder un niveau de rentabilité suffisant, l'entreprise doit agir sur la diminution des coûts de production, et donc, entre autre, sur l'optimisation de la planification.

## **2.3 Améliorer la visibilité**

Selon Dolgui et al. [Dolgui et al., 06], la visibilité est à considérer à deux niveaux principaux. Le premier niveau concerne la visibilité de l'état du système de production. Chaque intervenant dans le processus de production doit pouvoir disposer, à tout instant, d'une information pertinente sur l'état des différents éléments qui constituent ce processus, tels que l'état des ressources, l'état des stocks, etc. Une telle visibilité est très utile, d'une part, pour permettre l'adaptation du planning établi compte tenu de l'état du système et, d'autre part, pour attirer l'attention des décideurs sur les anomalies qui peuvent perturber le travail. Sa réalisation nécessite la mise en œuvre de mécanismes de suivi et de mesure de l'état du système de production. Le deuxième niveau concerne la visibilité de la demande du client. Dans un contexte économique marqué par une forte concurrence, avoir la capacité de réagir rapidement aux demandes des clients, voire même les anticiper, représente un facteur important pour garder une place sur le marché. Dans cette optique, en plus des techniques classiques de prévision, les entreprises s'orientent vers une caractérisation des habitudes des clients pour leur fournir des produits qui leur conviennent, établissant ainsi une relation de coopération et d'échange avec eux.

## 3 La gestion de la production

### 3.1 Caractérisation du système de gestion de la production

Le rôle du système de gestion de la production est de « déterminer un ensemble de décisions assurant une organisation efficace de la production compte tenu des multiples contraintes internes ou externes à l'entreprise » [Hétreux, 96] [Roux, 97]. Sa tâche est vaste et complexe à cause du grand nombre d'éléments à prendre en compte ainsi que des problématiques à résoudre et des objectifs à satisfaire. Il se compose généralement de deux sous-systèmes suivants [Huguet, 94], [Hétreux, 96], [Despontin-Monsarrat, 04] :

- Le *sous-système d'information* : qui a pour charge de collecter les informations relatives au système de production (données internes) et à son environnement (données externes). Ces données sont très nombreuses et de natures très hétérogènes (données techniques, prévisions de demandes, contraintes temporelles, etc.). Elles sont organisées par le sous-système d'information et fournies au sous-système de décision.
- Le *sous-système de décision* : à qui revient la tâche d'élaborer les différentes décisions à mettre en œuvre pour assurer un fonctionnement convenable du système de production, en se basant sur les différentes données traitées par le sous-système d'information.

### 3.2 Les problématiques de la gestion de la production

La raison essentielle de la gestion de la production est la « *satisfaction des clients* ». Pour ce faire, elle doit coordonner la réalisation de produits :

- 1) en quantités voulues par le client,
- 2) dans les délais imposés par lui,
- 3) avec une qualité souhaitée,
- 4) et avec un prix bas.

Pour atteindre ces objectifs, la gestion de la production doit faire face à des problématiques de maîtrise et de régulation de flux [Courtois et al., 95]. Ces flux sont principalement de deux types :

- a) des *flux physiques* : qui correspondent à l'écoulement des matières à travers les éléments constitutifs du système de production (machines, postes de travail, zones de stockage, etc.). Les flux internes représentent les matières qui sont en train de subir une transformation au sein du système de production (en-cours, pièces d'assemblage, etc.). Les flux externes couvrent les matières premières et les composants qui sont approvisionnés ainsi que la livraison des produits finis aux clients,
- b) des *flux d'information* : qui se rapportent à la circulation des informations sur l'évolution des états du système de production. Parmi les informations traitées, nous citons le suivi des commandes, l'état des machines, le niveau des en-cours, les rebuts, etc.

Il va s'en dire que les objectifs cités pour la gestion de la production sont, souvent, antagonistes. A titre d'exemple, un produit de bonne qualité sera facilement vendu. Toutefois, l'obtention d'un produit de bonne qualité nécessite des investissements dans des procédures d'amélioration de la qualité qui vont augmenter le coût de revient de ce produit, ce qui rejaillit négativement sur sa compétitivité au niveau des prix sur le marché. C'est ainsi que la gestion de la production se trouve au carrefour des différents services de l'entreprise (commercial, financier, comptabilité, etc.). Afin d'assurer cette fonctionnalité transversale, le système de gestion de la production doit incorporer plusieurs activités que nous pouvons regrouper en quatre grandes fonctions qui sont les suivantes [Huguet, 94], [Despoutin-Monsarrat, 04] :

- la gestion des données techniques : elle couvre la gestion des différentes données se rapportant aux produits fabriqués par l'entreprise ;
- la gestion des matières : elle assure les décisions d'approvisionnement en matières premières et/ou en composants selon l'état réel du système de production et des demandes prévisionnelles ;
- la gestion des données commerciales : elle gère les carnets de commandes (fermes et prévisionnelles) et négocie les prix et les délais de livraison avec les clients ;
- la gestion du « travail » : elle organise dans le temps la réalisation des différentes opérations de fabrication des produits en leur attribuant les ressources nécessaires (décisions de planification et d'ordonnancement).

La gestion de la production est dès lors confrontée à l'élaboration de plusieurs types de décisions. La complexité rend incontournable le recours à une structure hiérarchisée.

### **3.3 Les niveaux de décision en gestion de production**

Comme nous venons de l'explicitier, la gestion de la production manipule un nombre important de données et est amenée à établir des décisions très variées. C'est R.N. Anthony qui a été le premier à introduire une classification des décisions de gestion de production en trois niveaux décisionnels [Anthony, 65]. Ces niveaux se différencient par la nature et la portée temporelle des différentes décisions. Anthony distingue ainsi :

- 1) le niveau stratégique : il concerne les décisions stratégiques qui traduisent la politique de l'entreprise à long terme. Ces décisions sont élaborées en se basant sur des données agrégées. Elles fixent essentiellement le portefeuille d'activités, la politique globale d'investissement ainsi que la capacité globale des ressources matérielles et humaines de l'entreprise sur un horizon à long terme. Par exemple, la politique budgétaire ou le choix de produire de nouveaux types de produits sont des décisions stratégiques ;
- 2) le niveau tactique : il regroupe les décisions tactiques qui concernent la planification de la production et des flux physiques à moyen terme. Une telle planification sera réalisée dans le cadre des décisions stratégiques. Les données manipulées à ce niveau restent agrégées, mais leur niveau de détail

est plus grand que celui des données manipulées au niveau stratégique. Ainsi, la planification de la production et de l'utilisation des ressources ainsi que l'ajustement des charges-capacités sont des exemples de décisions tactiques ;

- 3) le niveau opérationnel : il rassemble les décisions opérationnelles qui sont prises à court terme et à très court terme. Les données traitées à ce niveau sont très détaillées. Les décisions prises concernent principalement l'ordonnancement des activités définies par le plan de production sur les différentes ressources de l'atelier [Esquirol et al., 99]. La mise à disposition des matières premières et des composants est assurée par la gestion des stocks.

Cette décomposition hiérarchique des décisions suit, en fait, une organisation hiérarchique de l'entreprise manufacturière. Chaque niveau décisionnel est assuré par des personnes de catégories et de compétences différentes. Plus l'horizon est grand, plus les données sont imprécises et plus les risques et les responsabilités sont importants [Giard 03].

### **3.4 Offres en logiciels pour la gestion de la production**

Les caractéristiques de la gestion de production ont favorisé le recours rapide à l'outil informatique. Le stockage et l'échange des volumes importants de données ainsi que les importants calculs à réaliser ont été beaucoup facilités par l'exploitation des capacités des ordinateurs. Une offre logicielle abondante n'a cessé alors de se développer. Historiquement, le début de l'utilisation de l'informatique dans le champ de la gestion de production se situe vers le milieu des années 1960 avec le premier progiciel « Class », développé par la société IBM pour gérer une production complexe. Depuis, l'usage de l'informatique dans des problématiques de gestion de production a continué de croître et de s'améliorer pour offrir une gamme diversifiée de progiciels : GPAO, ERP, MES, CRM, PLM, etc. Les trois premiers sont ceux les plus proches du contexte de nos travaux.

#### **3.4.1 Les outils classiques de GPAO**

Les progiciels de Gestion de Production Assistée par Ordinateur (GPAO) sont nombreux et se sont sophistiqués au cours du temps. L'objet de ces progiciels est de répondre à la plupart des fonctions assurées par la gestion de la production. Les progiciels de GPAO utilisent une base de données techniques et sont décomposés en modules remplissant des fonctionnalités bien définies. Parmi les modules standards, nous citons :

- le Module Gestion des données techniques,
- le Module Plans directeurs,
- le Module Calcul des besoins,
- le Module Ordonnancement,
- le Module Lancement,
- le Module suivi des ordres de fabrication,
- le Module Gestion des stocks,
- le Module Gestion des achats et Approvisionnement,
- le Module Calcul des coûts.

Les progiciels de GPAO ont beaucoup aidé les industriels à mieux maîtriser les flux de production au sein de l'entreprise.

### 3.4.2 Les ERP

ERP est l'acronyme de la désignation anglo-saxonne « Entreprise Resource Planning », traduite souvent en français par « *Progiciel de Gestion Intégré* ». Un ERP est défini comme étant « *un progiciel à large couverture fonctionnelle, basé sur une organisation par processus, visant à intégrer les fonctions de l'entreprise* » [Bourrière et al., 04]. Les ERP se basent essentiellement sur l'exploitation d'une base de données unique via des outils avancés de collecte et de regroupement des données (data mining) afin de générer des connaissances utiles sur les différents intervenants dans les processus de production (client, ressources, etc.).

### 3.4.3 Les MES

Si les ERP sont considérés comme des progiciels englobant les outils GPAO, les MES (Manufacturing Execution System) sont vus plutôt comme des outils qui prolongent dans la supervision directe, la réalisation de la production. En fait, les MES sont des outils de pilotage d'ateliers. Leurs fonctionnalités sont bâties autour des décisions opérationnelles de la gestion de production. Ils partent du résultat des modules Ordonnancement et calcul des besoins pour organiser, lancer et suivre l'évolution des ordres de fabrication au niveau de l'atelier. Les MES établissent ainsi la liaison entre le niveau de planification de la production et le niveau d'exécution qui n'est pas pris en compte par les ERP.

Les CRM (Customer Relationship Management) et PLM (Product Life-cycle Management) concernent respectivement les relations commerciales et la nomenclature détaillée du produit.

Dans les travaux de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur le niveau décisionnel tactique et spécifiquement sur la planification tactique de la production. Nous nous sommes intéressés aux problématiques visant à assurer au mieux la satisfaction du client, à améliorer la visibilité du système, à optimiser les coûts de production et à accroître la réactivité de la planification de la production dans un contexte industriel fluctuant.

Dans la partie suivante, nous faisons un survol des approches classiques de planification de la production. Ces approches constituent les bases des modules de planification offerts par les progiciels de GPAO ou les ERP.

## 4 Approches classiques pour la planification de la production

Les approches de planification des activités de la production se distinguent essentiellement selon qu'elles appliquent le concept du flux poussé ou le concept du flux tiré. Nous évoquons, à ce sujet, la méthode de planification MRP II, qui met en œuvre le principe de planification à flux poussé, ainsi que l'approche du Juste-à-temps qui concrétise le concept de planification à flux tiré.

## 4.1 La méthode MRP II

La méthode MRP II (*Manufacturing Resource Planning*), souvent traduite par Management des Ressources de la Production [Courtois et al, 95], est une évolution de la méthode MRP (*Material Resource Planning*) connue en français sous l'appellation *Planification des besoins en composants* ou parfois *calcul des besoins nets* [Colomb, 01].

Historiquement, la méthode MRP s'est développée aux Etats-Unis dans les années 1965-1970 et fût diffusée sous l'impulsion de J. Orlicky [Orlicky, 75] pour pallier aux limitations de la gestion traditionnelle des stocks qui gérait le besoin d'approvisionnement des articles d'une manière indépendante les uns des autres et sans prendre en considération les dates de ces besoins.

### 4.1.1 Principes du MRP

La méthode MRP se base sur la distinction entre les articles dépendants et les articles indépendants.

- Les articles indépendants sont les articles qui sont directement mis sur le marché. Ce sont des produits finis, des sous-ensembles ainsi que des pièces de rechange qui sont vendus aux clients.
- Les articles dépendants sont les articles qui composent les articles indépendants (matières premières, composants, etc).

Selon le principe d'Orlicky, *les besoins en produits indépendants ne peuvent être qu'estimés par des prévisions alors que les besoins en produits dépendants peuvent et doivent être calculés*. Ainsi, le calcul des besoins en composants commence par la prise en compte des quantités, prévisionnelles ou fermes, des produits finis à fabriquer. Ensuite, à l'aide des nomenclatures et des gammes de ces produits finis ainsi que des règles de gestion fixées (valeur du stock de sécurité, taille de lot, etc), les besoins bruts en composants sont calculés. On déduit les besoins nets en éliminant les stocks de composants déjà existants. Enfin, à partir de ces besoins nets, jalonnés dans le temps en fonction de la durée du cycle d'approvisionnement et de fabrication, les ordres d'achat envers les fournisseurs et les ordres de lancement de fabrication sont générés. Ceci dit, une des limitations majeures de la méthode MRP est qu'elle n'intègre pas la capacité de production du système à planifier et ne prend donc pas en compte le rapport entre cette capacité et la charge de production. Dans le cas où la charge s'avère supérieure à la capacité de l'atelier, il faut procéder à un lissage de la production pour que le plan de production soit réalisable. Cette limitation, avec d'autres, ont été levées par l'évolution vers la version améliorée MRP II qui a introduit également les aspects financiers pour permettre une gestion prévisionnelle intégrée de l'ensemble des ressources de l'entreprise.

### 4.1.2 Structure décisionnelle hiérarchique de la planification MRP II

L'évolution vers la méthode de planification MRP II s'est donc justifiée principalement par le besoin d'anticiper la planification de la capacité de l'entreprise et de vérifier ainsi, l'adéquation de cette capacité par rapport à la charge de production prévue. Aussi, la capacité considérée est étendue et concerne aussi bien celle des ressources de production,

d'approvisionnement, de sous-traitance, de stockage, etc., que celle des moyens budgétaires et d'investissement.

Un autre apport de l'évolution vers MRP II est de permettre une planification de la production depuis le long terme jusqu'au court terme [Courtois et al., 95]. A ces fins, la méthode MRP II se fonde sur une structure décisionnelle hiérarchique comportant différentes étapes de prise de décision et de planification, généralement résumées par les cinq grandes étapes suivantes [Vollman et al., 97] :

- le plan stratégique,
- le plan industriel et commercial (PIC),
- le programme directeur de production (PDP),
- la planification des besoins en composants (MRP)
- le pilotage d'atelier.

De fait, la hiérarchisation fonctionnelle et décisionnelle constitue un principe fondamental de l'approche MRP II. A chaque étape, un plan est élaboré avec un objectif bien précis, un horizon temporel spécifique et un certain niveau de détail des données manipulées. Pour pouvoir passer à l'étape suivante, le plan qui vient d'être calculé à capacité infinie doit faire l'objet d'une vérification de son adéquation avec la capacité finie existante pour obtenir ainsi un plan réalisable. Ce plan réalisable servira ensuite comme un cadre de décision pour l'élaboration du plan de l'étape inférieure. Chaque fois que l'on descend dans la structure, les données manipulées et les décisions prises sont de plus en plus désagrégées. Cet affinement successif d'une étape à une autre permet enfin de produire la planification opérationnelle de la production au niveau de l'atelier.

De par l'orientation de nos travaux de thèse portant sur la planification tactique, nous sommes concernés par les fonctionnalités du PIC et du PDP.

### **4.1.3 Le Plan Industriel et Commercial**

Le plan industriel et commercial (PIC) occupe la deuxième place dans la hiérarchie décisionnelle de l'approche MRP II, juste après le Plan stratégique. Il porte sur l'évaluation prévisionnelle des charges de travail des différentes ressources et permet, ainsi, d'anticiper les problèmes potentiels, notamment ceux concernant une inadéquation entre la capacité globale de production et la charge induite par les prévisions de ventes agrégées. Le calcul des charges au niveau du PIC se fait généralement en utilisant des gammes de production agrégées (macro-gammes) qui indiquent, par famille de produits, les temps opératoires globaux pour les ressources critiques.

### **4.1.4 Le Programme Directeur de Production**

Le programme directeur de production (PDP) porte, quand à lui, sur la planification de la production détaillée tout en restant dans le cadre décisionnel fixé par le PIC. Le PDP raisonne en produits finis et précise les quantités à produire, période par période [Vollman et al., 97]. Ses principales fonctions se résument par [Courtois et al., 95], [Genin, 03] :

- concrétiser le PIC en désagrégant la production par famille de produits en production par produit finis,

- définir les programmes d'approvisionnement des matières et des composants via le calcul des besoins,
- suivre les ventes réelles en comparant les commandes prévisionnelles aux commandes réelles,
- évaluer le disponible à la vente qui représente les quantités de produits finis qui pouvant être vendues instantanément sans remettre en cause le PDP prévu,
- caractériser l'évolution du stock afin de garantir le meilleur compromis entre qualité de service et coût de production.

Généralement, le PDP s'étend sur un horizon de planification qui couvre le plus grand délai cumulé d'approvisionnement et de fabrication. Il est révisé régulièrement avec une périodicité de l'ordre de la semaine [Genin, 03]. Différents événements perturbateurs tels que des modifications de demandes client, des pannes machines, des retards dans les dates de livraison de matières premières et/ou composants, etc. peuvent nécessiter la remise en cause du PDP et provoquer des replanifications. Pour atténuer l'ampleur de telles modifications du PDP, une pratique fréquente consiste à prévoir une période figée (appelée encore horizon gelé) dans laquelle le changement des décisions est interdit [Vollman et al, 97], [Genin, 03].

## 4.2 L'approche du Juste-à-temps

L'approche de planification de la production Juste-à-temps (JAT) s'est développée, au départ, au Japon, principalement avec l'entreprise japonaise TOYOTA Motors Company à partir des années 50. Elle a secoué ensuite, l'industrie occidentale depuis le début des années 80. Le JAT est vu comme « *une philosophie de production globale, qui est supportée par des méthodes et des techniques* » [Courtois et al., 95]. Cette philosophie se fonde sur une vision qui considère que la détention de stocks (y compris les en-cours) cache des prévisions de dysfonctionnements et de gaspillages du système de production. Des anomalies telles que les défauts de fabrication, les pannes machines et autres engendrent des interruptions de la production que seuls les stocks intermédiaires entre les différentes phases de production peuvent atténuer. Le JAT se propose de réduire progressivement les stocks jusqu'à atteindre le zéro stock et ce via une amélioration totale et continue du système de production. Par conséquent, l'élimination des stocks va permettre de tendre les flux physiques à l'intérieur du système de production ce qui rend l'entreprise capable de « *produire à la demande du client sans délai, tout en comprimant au maximum le coût complet de fabrication* » [Baglin et al., 96]. Ainsi, dans le contexte d'une philosophie JAT, c'est la demande client qui tire la production, d'où la désignation par philosophie de production à flux tirés.

### 4.2.1 La méthode KANBAN

C'est l'ingénieur Japonais M. Ohno qui a élaboré la méthode Kanban au sein de l'entreprise TOYOTA et, dès 1958, certaines lignes de production TOYOTA ont commencé à fonctionner sur la base de cette méthode.

La méthode Kanban représente un système de pilotage à court terme d'atelier de production. Elle s'appuie sur un principe simple : « *un poste amont ne doit produire que ce qui lui est demandé par son poste aval qui ne doit lui-même produire que ce qui lui est*

*demandé par son propre poste aval et ainsi de suite, le poste le plus en aval ne devant produire que pour répondre à la demande de clients* » [Courtois et al., 95]. Dans une telle méthode, l'ordonnancement de la production devient alors tiré par l'aval. Le système Kanban se base ainsi sur la circulation de l'information qui doit remonter rapidement les besoins du poste aval vers le poste amont. Cette information, qui correspond à une sorte d'ordre de fabrication, est contenue dans un « kanban ». Kanban est un terme Japonais qui signifie étiquette ou support d'information. Parmi les informations que renferme un kanban, on distingue la désignation de la pièce et de l'opération, la désignation des postes d'origine et de destination ainsi que la quantité de pièces par conteneur inter-postes.

## **5 Le recours à la modélisation et à l'analyse des systèmes de production**

### **5.1 Les approches de modélisation et d'analyse**

Pour faire face à des problèmes de gestion et de planification de la production, deux approches différentes peuvent être adoptées [Thierry, 03]. La première approche, dite analytique, consiste à construire (générer) une ou plusieurs solutions à partir de la résolution d'un modèle du problème traité. La deuxième approche, dite par simulation, se base sur l'évaluation des performances du système de production à partir de l'expérimentation (simulée) d'une ou plusieurs solutions envisagées pour retenir la solution qui présente le meilleur compromis. Les deux approches commencent donc, par l'élaboration d'un modèle qui décrit le système réel étudié ; les modèles sont naturellement différents selon que nous utilisons une approche analytique ou une approche par simulation.

#### **5.1.1 L'approche analytique**

Qui dit approche analytique dit utilisation d'un modèle analytique qui décrit, selon un formalisme mathématique, le système étudié et les objectifs à atteindre. La formalisation mathématique implique :

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

Ainsi, le but d'une modélisation analytique est d'obtenir, par le calcul, les décisions à prendre pour optimiser le critère choisi tout en satisfaisant les contraintes imposées. Un modèle analytique peut, par exemple, être formulé en utilisant la programmation linéaire, la programmation dynamique, la théorie des files d'attente, etc. Les logiciels, solveurs commerciaux ou libres, sont abondants et offrent des environnements complets pour la

programmation et la résolution sophistiquée de tels modèles, ce qui facilite la tâche du décideur.

Toutefois, la conception d'un modèle analytique est souvent limitée par la complexité du système étudié. Quand c'est le cas, le modèle analytique subit forcément d'importantes simplifications par rapport à la réalité, ce qui peut dégrader l'efficacité des décisions calculées. En outre, une approche analytique ne prend souvent en compte, en pratique, qu'un seul critère.

Pour ce qui concerne le domaine de la gestion de production, et plus spécifiquement les problèmes de planification tactique de la production, nous disposons d'une large panoplie de modèles analytiques. Un grand nombre de ces modèles sont détaillés dans plusieurs ouvrages ([Johnson et al. 74], [Stadler, 05]). Dans notre travail de thèse, nous nous situons dans la cadre des approches analytiques.

### 5.1.2 L'approche par simulation

La simulation est définie comme « la procédure de conception d'un modèle du système réel et son expérimentation à l'aide de ce modèle afin :

- soit de comprendre le comportement de ce système,
- soit d'évaluer les stratégies de contrôle de ce système. »

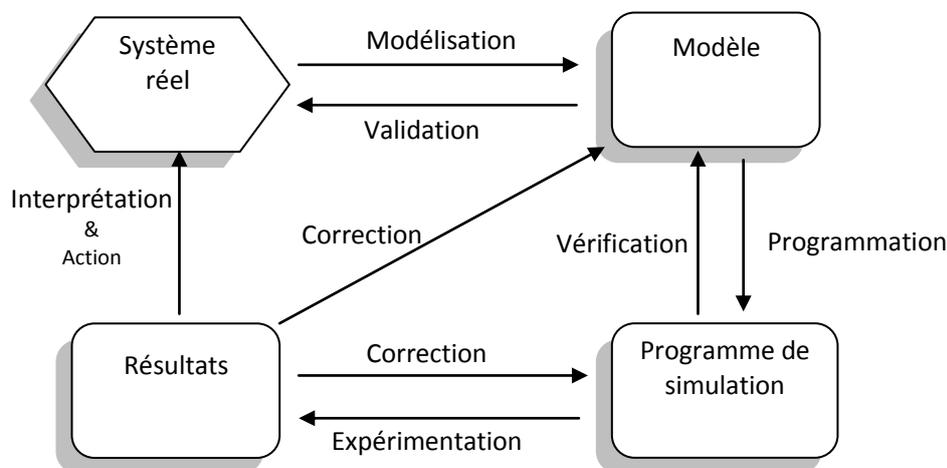


Figure I-1 Phases de la simulation (extrait du cours de Jean-Louis Boimond, Université d'Angers ISTIA).

Dans ce contexte, Dolgui et Proth insistent sur le fait qu'il peut exister plusieurs modèles possibles d'un même système physique donné, à l'encontre de la définition de Shannon [Dolgui et al, 06]. Classiquement, nous distinguons quatre grandes phases pour mener une simulation, comme le montre la figure I-1. Tout d'abord, nous commençons par la modélisation du système étudié. Ensuite, le modèle conçu est programmé via un logiciel de simulation. Après, l'expérimentation est mise en œuvre à l'aide de ce logiciel. Enfin, les résultats simulés sont interprétés et accompagnés d'actions puis resimulés et ainsi de suite, jusqu'à avoir des résultats satisfaisant le décideur compte tenu des critères visés.

En comparaison avec l'approche analytique, une approche par simulation présente un certain nombre de différences. En premier lieu, elle permet de retenir plusieurs critères et non un seul. En second lieu, la simulation ne construit pas une solution ; elle permet de traduire l'effet d'une solution déjà conçue par l'utilisateur sur la suite des états du système et sur les valeurs des critères retenus sur l'horizon de l'étude. Enfin, la simulation n'est pas une technique d'optimisation au sens propre du mot. Elle ne peut qu'indiquer les conséquences des décisions prises par l'utilisateur sur le comportement du système. Dans ce sens, la simulation se présente comme une technique itérative qui n'établit pas une solution finale. Elle permet au décideur d'envisager des choix possibles en fonction de ce qui répond le mieux aux problèmes posés.

## **5.2 Exemples d'outils logiciels de simulation et de résolution de modèles analytiques**

Le développement d'outils logiciels, dédiés à la simulation des systèmes et à la résolution de modèles analytiques, a été favorisé par le progrès des technologies informatiques. Il s'agit du développement dans les langages de programmation (du Fortran à Java), de l'interaction Homme-Machine, des outils graphiques, des réseaux informatiques et notamment de la toile mondiale (www). Tout ceci a permis d'accroître les capacités et la facilité d'utilisation des ces outils logiciels.

### **5.2.1 Quelques outils de simulation**

Les outils et langages de simulation sont très nombreux. Historiquement, le premier simulateur, appelé GSP pour « General Simulation Program » est apparu en 1960. Depuis, les outils de simulation n'ont pas cessé de se multiplier et se développer. Dans ce paragraphe, nous nous contentons de citer quelques outils qui sont largement connus dans l'étude et la simulation des systèmes de production : Arena, Flexsim, Supply Chain Builder et Supply Chain Sim, etc.

D'autres logiciels de simulation peuvent être consultés dans l'ouvrage de Dolgui et Proth [Dolgui et al. 06].

### **5.2.2 Quelques outils de résolution de modèles analytiques.**

Nous nous intéressons, au cours de notre travail, à un type bien particulier de modèles analytiques qui sont les modèles linéaires. Dans ce contexte, nous distinguons une panoplie de logiciels dédiés à l'optimisation de ces modèles linéaires. Dans ce qui suit, nous citons quelques logiciels souvent utilisés aussi bien au niveau académique qu'au niveau industriel : IBM ILOG Cplex Optimizer, Xpress-MP, GLPK (GNU Linear Programming Kit), etc.

## 6 Les nouvelles structurations des entreprises manufacturières : les chaînes logistiques

### 6.1 Emergence des relations de partenariat

L'évolution des caractéristiques du marché a été toujours suivie par une évolution des stratégies des entreprises manufacturières. Au début de ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux changements qui ont affecté l'environnement économique. A partir des années 90, la mondialisation des marchés et l'internationalisation des échanges deviennent progressivement une réalité à laquelle font face les entreprises manufacturières. Deux modes d'internationalisation des échanges industrielles ont été favorisés [Burlat, 01] :

- L'exportation, qui concerne la vente à l'étranger d'une partie de la production réalisée dans chaque pays. La part d'exportation de la production industrielle mondiale a vu une croissance de 15% en 1973 à 29% en 2000.
- La délocalisation, qui consiste à assurer une partie de la production par des filiales dans différents pays. Le taux de la délocalisation de la production industrielle mondiale a augmenté de 13% en 1973 à 25% en 2000.

Dans une telle conjoncture, le marché mondial devient, de plus en plus instable, avec une mauvaise visibilité des ventes et une concurrence accrue, ce qui accroît la difficulté des entreprises à orienter leurs investissements. Face à une telle situation, les nouvelles stratégies des entreprises se matérialisent par une recherche continue d'un compromis entre deux principales exigences : accroître le potentiel d'adaptation au marché tout en se focalisant sur le cœur de métier (core-business). De tels objectifs, contradictoires au niveau de l'entreprise, peuvent toutefois être obtenus au travers d'un partenariat d'entreprises. Dans cette perspective, Bourrière et al. 04, détaillent les apports du partenariat en le présentant comme étant « *fondamentalement une réponse à la problématique de l'instabilité des marchés. Il permet d'obtenir, à l'échelle d'un réseau d'acteurs industriels (donneurs d'ordres, fournisseurs, sous-traitants), les caractéristiques requises de réactivité aux opportunités de marché, tout en limitant la dispersion des activités de chacun des partenaires, qui tendent à externaliser (c'est-à-dire sous-traiter) les activités ne relevant pas de leurs savoir-faire spécifiques. En outre, le partenariat permet le partage des risques stratégiques et financiers inhérents à la mauvaise visibilité des marchés* » [Bourrières et al., 04].

C'est ainsi que les entreprises abandonnent les anciennes relations marchandes fondées sur des rapports de pouvoir avec leurs fournisseurs et leurs sous-traitants, pour favoriser des relations de partenariat fondées sur la complémentarité des compétences. C'est dans ce contexte de profonde transformation des relations inter-entreprises qu'à émergé une nouvelle structuration en réseau des entreprises industrielles connue sous le concept de « chaîne logistique ».

## 6.2 Fondements des chaînes logistiques

### 6.2.1 Définitions

Plusieurs définitions ont été proposées pour caractériser le terme chaîne logistique. Ce terme dérivé de l'anglais « Supply Chain » se traduit littéralement « chaîne d'approvisionnement ». La diversité des définitions montre l'intérêt des chercheurs pour l'étude des « chaînes logistiques ». Dans le tableau I-2, nous recensons quelques unes des définitions développées dans la littérature :

[Jones et al., 85]	<i>La CL regroupe la planification et le pilotage de l'ensemble du flux matière depuis le fournisseur jusqu'au client final en passant par le producteur et le distributeur</i>
[Ellram, 91]	<i>La CL est un réseau d'entreprises en interaction, liées entre elles par diverses flux, depuis l'approvisionnement en matière première jusqu'à la livraison finale, et œuvrant à la réalisation de produits ou de services pour des clients finaux</i>
[Christopher, 92]	<i>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.</i>
[Lee et al., 93]	<i>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.</i>
[La Londe et al., 94]	<i>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.</i>
[Ganeshan et al, 95]	<i>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.</i>
[Christopher, 98]	<i>La CL englobe les processus de gestion stratégique de l'approvisionnement, des mouvements de stocks de matières, de composants et de produits finis ainsi que des flux d'informations qui y sont associés. L'organisation des canaux de ventes se fait de telle sorte que la rentabilité actuelle et future soit maximisée à travers le processus d'exécution de la commande</i>
[Tayur et al, 99]	<i>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.</i>
[Stadlter et al., 00]	<i>Une chaîne logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physique,</i>

	<i>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.</i>
[Rota-Franz et al, 01]	<i>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.</i>
[Mentzer et al, 01]	<i>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.</i>
[Poirier et al, 01]	<i>Une chaîne logistique est le système grâce auquel une entreprise amène ses produits et ses services jusqu'à ses clients</i>
[Gémin, 03]	<i>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.</i>
[Lummus et al., 99]	<i>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.</i>
[Feniès, 06]	<i>La CL est un système complexe décrit comme:-Un ensemble ouvert traversé par des flux financiers, matériels et informationnels-Un réseau composé d'entités physiques (usines, ateliers, entrepôts, distributeurs, grossistes, détaillants) et d'organisation autonomes (firmes, filiales, business unit, etc.)-Un ensemble d'activités regroupées dans un processus logistique dont l'agencement constitue une chaîne de valeur intra et inter-organisationnelle</i>
[Amrani-Zouggar, 09]	<i>La chaîne logistique peut être considérée comme un ensemble d'activités en réseau, incluant différents partenaires, coordonné par des flux matériels et informationnels échangés, visant à satisfaire au mieux les besoins des clients.</i>

**Tableau I-1 Définitions de la chaîne logistique.**

En nous référant à cette liste de définitions, nous pouvons établir certaines constatations :

- Les chaînes logistiques existent aussi bien dans les organisations de production de services que de production de biens [Ganeshan et al., 95],
- La définition d'une chaîne logistique est appréhendée selon deux approches [Thierry, 03] : l'approche produit ou l'approche entreprise. Dans ce contexte, on parle d'une chaîne d'un produit ou d'une famille de produit alors que celle orientée entreprise, s'intéresse à une entreprise bien particulière et cerne l'ensemble des acteurs avec qui elle est en relation pour pouvoir acheminer ses produits vers ses clients [Poirier et al. 01],
- Une chaîne logistique peut être considérée soit comme une succession de relations Client/Fournisseur [Tayur et al., 99], soit comme une succession d'activités de

création de valeur [La Londe et al., 94], soit comme un ensemble de processus d'approvisionnement, de transformation et de distribution [Lee et al., 93],

- Entre les entreprises d'une même chaîne logistique trois types de flux circulent qui sont le flux d'information (ex : commandes), le flux physique ( ex : transfert de produits) et le flux financier (ex : paiement des achats).

## 6.2.2 Typologie de chaînes logistiques

La structuration des éléments qui composent une chaîne logistique constitue la « typologie » de cette chaîne.

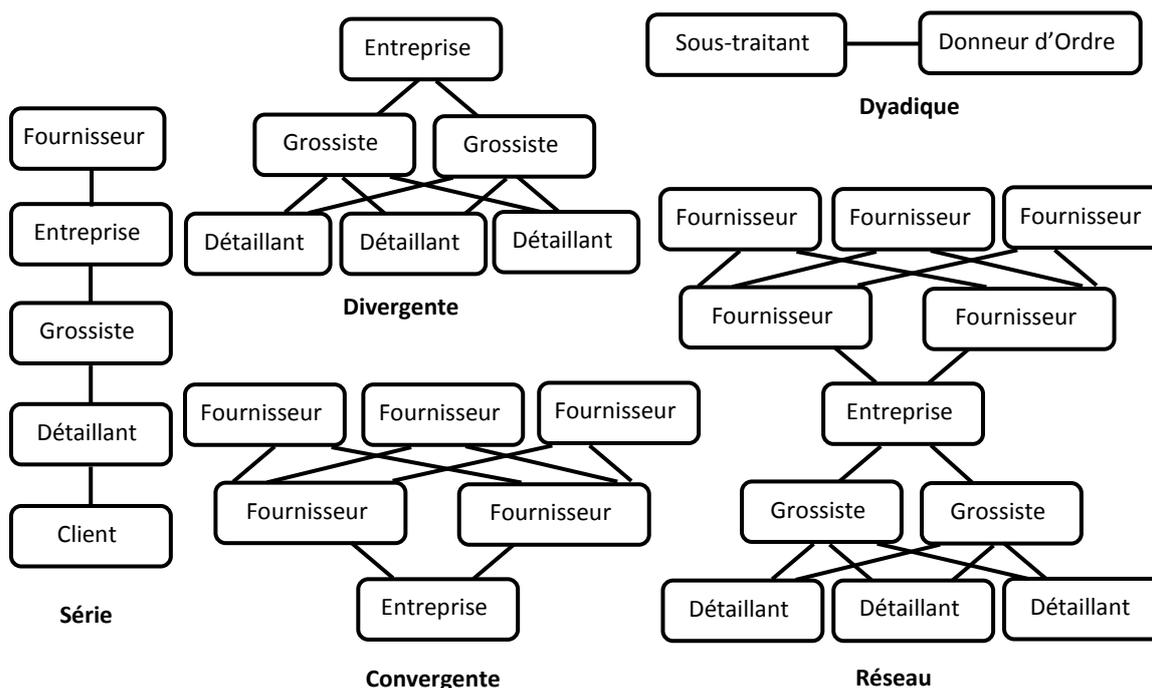


Figure I-2 Cinq structures typiques de la chaîne logistique

Dans ce contexte, cerner l'ensemble des cas réels des structures des chaînes logistiques reste un travail difficile [Galasso, 07], vu la grande variété des types de fabrication et des périmètres des chaînes. Toutefois, la littérature scientifique distingue un ensemble de typologies usuelles de chaînes, sur lesquelles sont fondées les modélisations existantes. Huang et al., proposent cinq structures typiques de chaînes logistiques [Huang et al., 03] (figure I-2).

- La structure en Série : concerne un procédé de fabrication linéaire et vertical. Cette structure est souvent utilisée pour étudier l'impact de la propagation de l'information sur l'ensemble de la chaîne [Galasso, 07].
- La structure Dyadique : est considérée comme un cas particulier d'une chaîne logistique en série, limitée à deux étages [Kehoe et al., 01]. Généralement, une telle structure constitue une base pour l'étude de relations de type Client/Fournisseurs dans une chaîne logistique.

- La structure Divergente : permet de représenter un réseau de distribution, dans le but d'étudier des problématiques telles que la localisation des sites de distribution ou leur dimensionnement. Ce type de structure est très fréquent dans l'industrie électronique : un exemple de configuration possible sera composé par un fournisseur de cristaux de silicium, des constructeurs de puces formant les clients de rang 1, des constructeurs de circuits électroniques pour le rang 2 et des assembleurs de téléphones mobiles en ce qui concerne le rang 3.
- La structure Convergente : permet de modéliser un processus d'assemblage afin d'étudier des problématiques divers comme, par exemple, le choix des fournisseurs. Cette structure est présente souvent dans l'industrie automobile. Par exemple, une usine de construction de voitures aura des fournisseurs d'équipements (carrosserie, pare-brise, etc.) dans le rang 1, des fournisseurs de textiles pour le rang 2, etc.
- La structure en Réseau : cette structure est une composition d'une structure divergente et convergente ce qui permet de modéliser des chaînes logistiques complexes. Dans le cas de certaines chaînes logistiques très étendues avec un nombre important d'entreprises, Lambert et Cooper [Lambert et al., 00] ainsi que Min et Zhou [Min et al., 02] adoptent une approche qui se base sur le classement des acteurs de la chaîne en deux catégories : les acteurs essentiels (qui contribuent à l'élaboration du produit) et les acteurs secondaires (banques, consultants, etc.). Ces auteurs préconisent alors de restreindre le réseau à étudier en se concentrant seulement sur les membres essentiels de la chaîne et en se focalisant sur certaines relations avec les fournisseurs les plus onéreux ou les plus critiques par exemple.

Dans le cadre de notre thèse, nous proposons, dans les chapitres suivants, d'étudier la planification de production d'une entreprise tout en tenant compte de ses relations avec ses fournisseurs directs, ses sous-traitants et ses clients. La structure qui permet de se focaliser sur une entreprise centrale de la chaîne logistique tout en intégrant ses relations en amont et en aval est la structure en réseau. En nous référant à cette structure, nous développons, dans les chapitres suivants, une modélisation plus détaillée et plus fine du cadre de notre travail.

Dans la réalité industrielle, nous distinguons certaines formes bien particulières de chaînes logistiques ayant des appellations bien spécifiques que nous présenterons dans le paragraphe suivant.

### **6.2.3 Réseaux d'entreprises et chaînes logistiques**

Dans le paragraphe précédent, nous avons abordé les structurations des chaînes logistiques. En plus de cet aspect structurel, les objectifs qui amènent les différentes entreprises à nouer des relations de partenariats donnent lieu à une terminologie bien particulière [Jagdev et al. 03]. La littérature distingue les catégories suivantes de réseaux d'entreprises-partenaires :

- L'entreprise multi-sites : fait référence à une entreprise dont la production est répartie sur plusieurs sites distingués géographiquement. Juridiquement, les sites font partie de l'entreprise mère.

- L'entreprise virtuelle : est un réseau d'entreprises, géographiquement dispersées et juridiquement indépendantes qui sont gérées comme une seule entité. La caractéristique majeure d'une entreprise virtuelle est qu'elle représente un réseau collaboratif temporaire, créé pour répondre à un marché bien spécifique et dont la durée de vie est limitée à celle du marché visé. Dans ce réseau, les entreprises partenaires vont faciliter le partage rapide de leurs ressources et la circulation des informations pour dégager une meilleure exploitation des opportunités du marché. (Ex : Airbus de 1967 à 1970).
- L'entreprise étendue : contrairement à l'entreprise virtuelle, une entreprise étendue est un réseau d'entreprises ayant une relation durable pour faire face à la concurrence dans le marché. Les entreprises partenaires sont juridiquement indépendantes mais partagent un même système de gestion d'une manière plus ou moins complète.

Les trois catégories de partenariat d'entreprise que nous venons de voir représentent trois formes différentes de *réseau d'entreprises*. D'une manière générale, un réseau d'entreprises désigne des entreprises qui entrent en liaison pour répondre à un besoin précis. Les réseaux d'entreprises ne sont pas obligatoirement basés sur le processus d'élaboration complet d'un produit fini donné, ce qui les distingue des chaînes logistiques. Cependant, dans le cas contraire, le réseau n'est autre qu'une chaîne logistique. Ainsi, la concept « réseau d'entreprises » est très général et peut inclure celui de la chaîne logistique.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la gestion des chaînes logistiques, connue dans la terminologie anglo-saxonne sous le terme Supply Chain Management.

## 6.3 La gestion des chaînes logistiques

### 6.3.1 Définitions

Le concept « Supply Chain Management (SCM) » traduit sous le terme gestion de la chaîne logistique, donne lieu à de nombreuses définitions dans la littérature scientifique ([Mentzer et al., 01], [Croom et al., 00]). Nous avons choisi de les regrouper dans le tableau suivant.

[Jones et al., 85]	<i>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.</i>
[Thomas et al., 96]	<i>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.</i>
[Geunes et al., 01]	<i>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.</i>
[Rota-Franz et al., 01]	<i>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.</i>
[Mentzer et al., 01]	<i>« le supply chain management peut être défini comme la coordination systémique, stratégique des fonctions</i>

	<i>opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne »</i>
[Thierry, 03]	<i>De manière très générale on peut définir la gestion de chaînes logistiques comme les décisions qui permettent d'optimiser les performances de la chaîne logistique.</i>
[Simchi-Levi et al.,03]	<i>le SCM est « un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs et les détaillants de façon à garantir la production et la distribution des produits finis au bon moment, au bon endroit, en bonne quantité, en respectant les exigences des clients finaux, et ce au moindre coût ».</i>
[Genin, 03]	<i>La gestion de la chaîne logistique est une approche intégrée de gestion qui consiste à piloter dans leur ensemble les flux des matières et d'informations depuis les fournisseurs jusqu'aux utilisateurs finaux, ainsi que les flux retours au moyen d'outils de planification et d'aide à la décision. Elle a pour but de diminuer les besoins en fond de roulement de l'entreprise ainsi que de satisfaire les clients par la mise à disposition, au meilleur coût, d'une quantité de produits, à l'endroit et au moment où la demande existe</i>
[Dominguez et al., 04]	<i>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.</i>
[Steadtler, 05]	<i>le SCM (Supply Chain Management) est défini comme: « la démarche permettant l'intégration d'unités organisationnelles le long de la chaîne logistique et la coordination des flux physiques, informationnels et financiers dans le but de satisfaire le consommateur final et d'améliorer la compétitivité de la chaîne dans son ensemble »</i>
[François, 07]	<i>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.</i>

**Tableau I-2 Définitions du SCM**

Les définitions citées ci-dessus, mettent en évidence les deux principaux fondements sur lesquels se base l'approche SCM, à savoir :

- L'intégration de l'ensemble des partenaires composant la chaîne (du fournisseur au client final),
- La coordination entre les partenaires de la chaîne en ce qui concerne la gestion des trois flux qui circulent entre eux : flux information, flux matière et flux financier.

Le but de l'approche SCM est de pouvoir améliorer la compétitivité globale de la chaîne afin de satisfaire « au mieux » les besoins du client final [Steadtler, 05]. A cette

fin, le SCM fait référence aux méthodes et outils de management qui tendent à l'optimisation de l'ensemble de la chaîne. Le SCM s'appuie sur un système décisionnel hiérarchisé en niveaux, similaire à celui utilisé pour la gestion de la production à l'échelle d'une entreprise. Ce système décisionnel fait l'objet du paragraphe suivant.

### **6.3.2 Niveaux décisionnels pour la gestion des chaînes logistiques (SCM)**

Dans le cadre de la gestion des chaînes logistiques, certains concepts concernant l'entreprise ont été étendus et utilisés. Ainsi, les décisions assurant la gestion de la chaîne logistique se déclinent en trois niveaux décisionnels : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel ([Ganeshan et al., 95] ; [Shapiro, 98] ; [Huang et al., 03] , etc.).

#### **6.3.2.1 Le niveau stratégique**

Les décisions stratégiques qui sont prises à ce niveau matérialisent la politique à long terme de l'ensemble de la chaîne. Dans ce contexte, Ganeshan et al., proposent une classification des décisions stratégiques selon quatre grandes catégories de problématiques qui sont les suivantes [Ganeshan et al., 95] :

- 1) Déterminer les objectifs stratégiques communs pour l'ensemble des partenaires de la chaîne,
- 2) Définir la structure de la chaîne, essentiellement en termes de typologie et de choix des différents partenaires,
- 3) Développer la compétitivité de l'ensemble des entreprises partenaires,
- 4) Faire évoluer les stratégies du management de la chaîne.

Un exemple des décisions prises à ce niveau se présente comme suit [Bel et al, 96] [Miller, 01] :

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

Les décisions stratégiques ont une grande influence sur la réussite ou l'échec de la chaîne en termes de compétitivité et de rentabilité sur le marché. Ces décisions stratégiques sont l'objet d'une prise de risque compte tenu du changement rapide et de l'évolution permanente des caractéristiques du marché.

#### **6.3.2.2 Le niveau tactique**

Les décisions tactiques concernent le moyen terme et doivent s'inscrire dans le cadre des décisions stratégiques. A ce niveau décisionnel, Tchernev identifie trois principales problématiques de planification à prendre en compte qui sont [Tchernev, 97] :

- La planification amont de la chaîne : programmer l'approvisionnement en matières premières et/ou en composants et assurer leur stockage,

- La planification de la production : gérer le flux de matières entre les unités de production,
- La planification aval de la chaîne : programmer la livraison des produits pour satisfaire la demande client.

L'objectif majeur du niveau tactique est d'optimiser l'exploitation des capacités techniques et humaines des différents partenaires de la chaîne afin de pouvoir optimiser les actifs circulants [Genin, 03]. Dans ce contexte, Shapiro considère qu'une telle optimisation est mise en œuvre le plus souvent par la maximisation ou la minimisation d'une fonction économique (des coûts ou des profits) [Shapiro, 98]. Des exemples de décisions caractéristiques pour la planification tactique de la chaîne logistique sont [Miller, 01], [Bel et al, 96], [Shapiro, 98] :

- Répartition des approvisionnements,
- Affectation des capacités de production aux familles de produits par usine,
- Détermination du taux d'utilisation des capacités, par usine et au niveau du réseau,
- Affectation des demandes aux centres de distribution,
- Choix précis du mode de transport et des transporteurs,
- Etc.

### 6.3.2.3 Le niveau opérationnel

Les décisions opérationnelles, prises à ce niveau, constituent une mise en œuvre des décisions planifiées au niveau tactique à l'échelle d'un site de fabrication ou d'un atelier. Ces décisions opérationnelles ont une portée temporelle de courte durée. Les décisions opérationnelles concernent des problématiques d'ordonnancement des activités de production et de transport, de régulation des flux physiques et de gestion à court terme des stocks. De plus, Giard inclut dans le cadre des décisions opérationnelles les décisions de suivi en temps réel de la production [Giard, 03]. Miller présente un ensemble de décisions opérationnelles parmi lesquelles [Miller, 01] :

- Traitement et ordonnancement des commandes clients,
- Ordonnancement et gestion des entrepôts,
- Ordonnancement des ressources de production (main d'œuvre, machines, etc.)
- Ordonnancement des tournées de véhicules,
- Ordonnancements quotidien et hebdomadaire au niveau des unités de stockage (*Stock Keeping Units, SKU*) incluant la gestion des priorités.

Vis-à-vis des trois niveaux décisionnels que nous venons de présenter, notre travail de thèse s'inscrit dans le cadre du niveau tactique. Ainsi, nous considérons que la structure de la chaîne est bien définie et nous ne nous intéressons pas aux problèmes d'ordonnancement des ordres de fabrication qui fait partie du niveau opérationnel.

### 6.3.3 Offre logicielle dédiée au SCM

En plus des outils logiciels assurant la gestion de la production au niveau de l'entreprise, une offre logicielle orientée vers la gestion des chaînes logistiques et réseaux d'entreprises a été également développée en se basant sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Dans ce contexte, nous citons :

**Les APS (pour *Advanced Planning System*)** ou SPA (Système de Planification Avancée) désignent une gamme de logiciels destinés à assurer la planification de l'ensemble de la chaîne logistique (demande, achats, production, stockage, transport). En fonction de la demande en aval de l'entreprise, l'APS permet d'effectuer une analyse de la capacité des ressources (machines, main d'œuvre, matières, aires de stockage) afin de proposer un plan d'activité détaillé permettant d'assurer une production optimale.

**Les SCE (*Supply Chain Execution*)** est une gamme d'outils logiciels ayant pour fonctionnalité de rationaliser la totalité du cycle de traitement des commandes (de l'entrée à la facturation). Ces outils fédèrent trois fonctions: la gestion avancée des commandes (AOM : *Advanced Order Management*), la gestion et l'optimisation de l'entreposage (WMS : *Warehouse Management Systems*) et la gestion des transports (TMS : *Transport Management System*).

**Les CRM (*Customer Relationship Management*)** sont des outils répandus dans les entreprises et associés à la fonction « vente ». Ces outils permettent une meilleure connaissance des besoins du client et un meilleur suivi des prévisions de ventes.

## Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons retracé l'évolution des systèmes de production et caractérisé leurs enjeux et leurs exigences. Cette évolution est une conséquence du changement du paysage économique qui s'est transformé progressivement d'une économie d'échelle, préconisant la production de masse, vers une économie de réactivité favorisant une production qui s'adapte continuellement aux changements de l'environnement. C'est ainsi que, dans une telle conjoncture économique, les systèmes de production modernes considèrent la réactivité face aux fluctuations et la satisfaction au mieux des besoins des clients comme étant des facteurs clés pour accroître leur compétitivité et assurer ainsi leur survie sur le marché.

Le marché dans lequel évoluent les entreprises manufacturières, n'est plus un marché réservé local. En effet, l'internationalisation des échanges commerciaux et la libération du mouvement des capitaux a entraîné l'ouverture des marchés sur l'investissement étranger et la concurrence internationale. Dans ce nouveau contexte, l'entreprise manufacturière n'est plus capable à elle seule de s'adapter à cette concurrence mondiale. Ainsi, les entreprises se sont structurées en réseaux d'entreprises partenaires qui coopèrent pour la production d'un ou d'une famille de produits afin d'augmenter leur compétitivité. C'est l'émergence du concept de « chaîne logistique ».

La gestion des chaînes logistiques est un domaine de recherche très vaste qui traite un nombre important de problématiques décisionnelles touchant les trois niveaux de décisions : stratégique, tactique et opérationnel. Au cours de ce chapitre, nous avons donné une idée générale sur ces différentes problématiques.

Notre travail de thèse souhaite être une contribution à la planification tactique de chaînes logistiques confrontées aux incertitudes et fluctuations, caractéristiques fréquentes de l'environnement des réseaux d'entreprises. Pour améliorer ce niveau de planification, notre apport porte notamment sur la proposition de structures

décisionnelles, la modélisation du processus décisionnel, l'analyse des performances de l'approche proposée, etc.

Le chapitre suivant présente nos propositions concernant la planification réactive et robuste d'un maillon d'une chaîne logistique.

# ***Chapitre II***

## **Fondements d'une planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique**

### **Introduction**

Après avoir présenté globalement, dans le chapitre précédent, les problématiques issues de la gestion de chaîne logistique, nous consacrons ce chapitre au positionnement précis de notre travail dans le but de proposer notre approche de planification.

Nous nous intéressons essentiellement, à la planification tactique de chaîne logistique. Dans ce cadre, nous proposons, dans un premier temps, une revue des approches de planification de chaîne logistique rencontrées dans la littérature.

Nous abordons, dans un second temps, les différents aspects de risque, d'incertitude et de perturbation qui deviennent des concepts émergents concernant la recherche de la réactivité au niveau décisionnel. Nous nous focalisons, principalement, sur l'incertitude qui affecte la demande client. Dans ce contexte, nous détaillons les principales approches de modélisation d'incertitude sur la demande qui sont mises en œuvre dans des problématiques de planification de chaîne logistique.

Dans un troisième temps, nous développons notre approche de planification qui doit faire face à un environnement incertain. Dans cette perspective, la prise de décision sous incertitude implique deux enjeux qui sont la réactivité et la robustesse. Ainsi, avant de proposer notre structure décisionnelle, nous définissons ces deux concepts. Enfin, nous exposons des aspects relatifs à la mesure de performance dans les chaînes logistiques pour pouvoir dégager des indicateurs de performances qui nous seront utiles pour valoriser notre approche de planification.

### **1. Revue des approches de planification tactique des chaînes logistiques**

Dans cette partie, nous nous intéressons aux différentes approches de planification tactique des chaînes logistiques, que nous croisons dans la littérature. Comme nous l'avons vu au premier chapitre, les problématiques décisionnelles émanant du domaine de la gestion des chaînes logistiques sont réparties selon l'horizon temporel auquel le décideur se réfère. Dans ce contexte, nous rappelons que le niveau tactique concerne un horizon temporel de type moyen terme. En plus de ce cloisonnement horizontal des problématiques décisionnelles, Stadtler et al., proposent un cloisonnement vertical selon les quatre processus opérationnels clés de l'entreprise qui sont : l'approvisionnement, la production,

la distribution et la vente [Stadtler et al., 05]. Ces auteurs définissent alors une matrice des tâches de planification selon les niveaux décisionnels et les processus clés, comme l'illustre la figure suivante.

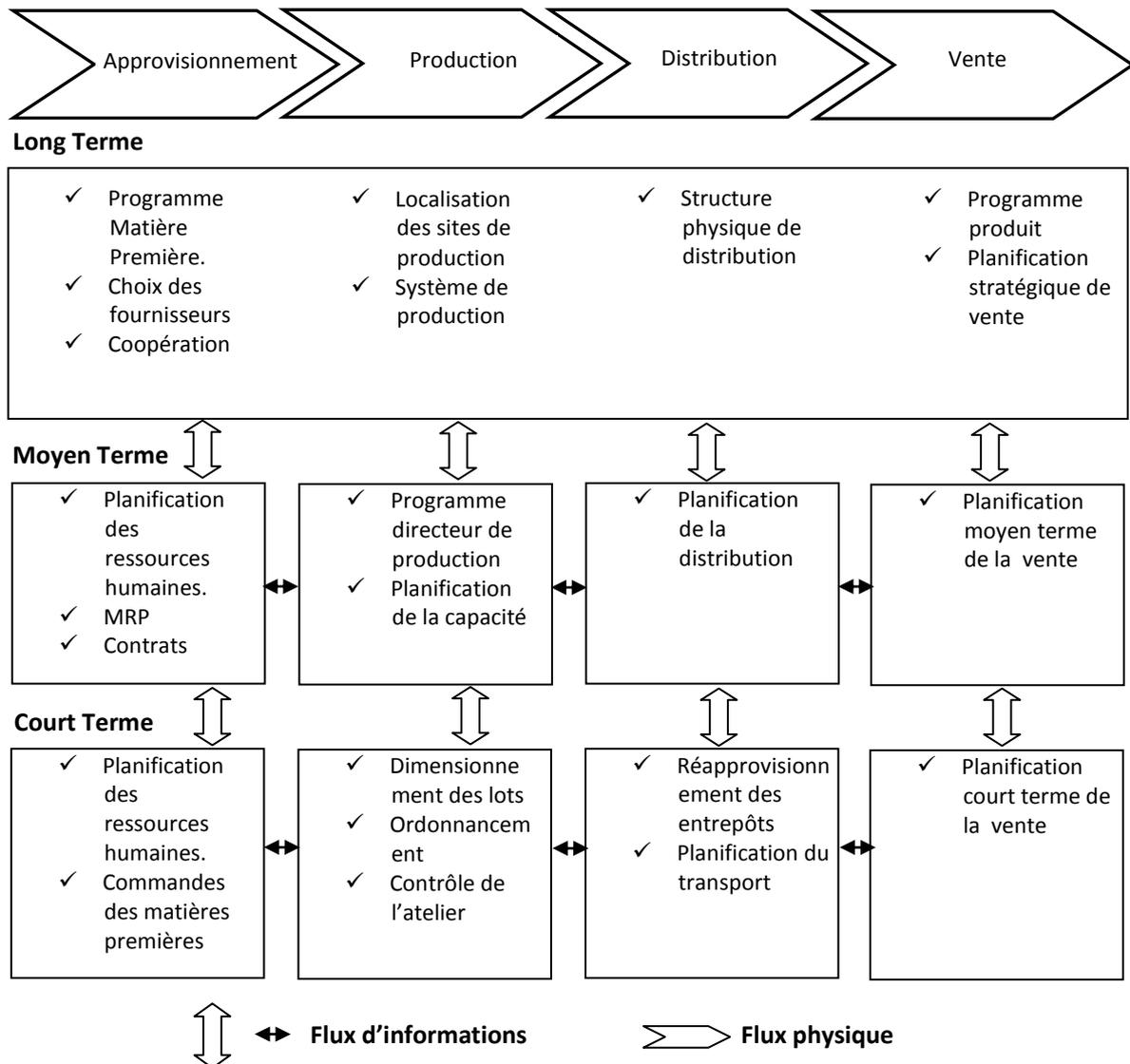


Figure II-1 Supply Chain Planning Matrix [Stadtler et al., 05]

Dans la suite de notre travail de thèse, nous nous intéressons aux problématiques de planification concernant essentiellement, les processus d'approvisionnement et de production, sur un horizon moyen terme. Dans ce cadre, l'élaboration des plans d'approvisionnement et de production requiert de recourir à une approche de planification permettant d'organiser la réalisation des différentes tâches qui s'y rapportent et assurer une utilisation efficace des ressources. Dans la littérature, nous distinguons trois grandes catégories d'approches de planification qui sont : les approches centralisées, les approches distribuées et les approches hiérarchisées ou mixtes. Les deux premières sont diamétralement opposées, alors que la troisième constitue une forme de compromis. Ces trois approches seront présentées dans ce qui suit.

## 1.1. Les approches centralisées

Ces approches appréhendent la planification de la chaîne logistique selon une vision globale. Elles se basent sur l'idée d'avoir une entité hiérarchiquement supérieure qui aura une prise en compte totale des flux de matières, d'informations et financiers qui circulent entre les différents acteurs de la chaîne. L'objectif est alors de pouvoir centraliser les décisions de planification des différentes activités sur la totalité de la chaîne afin d'assurer une meilleure coordination entre les acteurs et une gestion optimale de la chaîne dans son ensemble.

Dans un contexte réel, une entité centrale permettant de gérer la totalité de la chaîne pourra être [François, 07]:

- Un seul acteur dominant parmi les autres, tels qu'un donneur d'ordre principal ou un leader dans son domaine,
- Un ensemble de décideurs les plus influents de la chaîne,
- Un tierce acteur qui sera mandaté par les acteurs de la chaîne.

La mise en œuvre d'une approche centralisée pour la planification de la chaîne logistique suppose nécessairement un partage d'information entre les partenaires. Dans ce contexte, nous identifions des travaux de recherche étudiant l'effet de partage d'informations entre les partenaires d'une chaîne dans le cas de modèles centralisés. Nous citons essentiellement les travaux de Cachon et Fisher [Cachon et al, 00], de Thonemann [Thonemann, 02] et de Huang et al., [Huang et al., 03]. Ces derniers auteurs ont mis en évidence l'atténuation de l'effet bullwhip (effet coût de fouet ou effet de Forrester) grâce au partage d'information.

Les approches centralisées ont suscité un intérêt important dans le milieu académique comme le souligne les travaux de Christopher [Christopher, 92], Lee et Ng [Lee et al., 97a], Stock et al., [Stock et al, 98] et Beamon [Beamon, 98]. Différents types de modèles ont été conçus pour assurer une gestion de la chaîne logistique dans son ensemble. Dans ce cadre, nous citons des modèles déterministes, stochastiques, économiques et de simulation [Beamon, 98]. Toutefois, en pratique, la mise en œuvre d'une telle approche se heurte à deux problèmes majeurs [Bourrières et al., 05] :

- 1) Problème de confiance : qui se manifeste lors du partage d'information. En fait, il n'est pas tout à fait aisé de convaincre une entreprise partenaire de divulguer des informations pouvant être jugées confidentielles telles que ses capacités de production réelles ou ses coûts de revient. La connaissance de telles informations pourra rendre l'entreprise sous la domination de l'entité centrale.
- 2) Problème d'autonomie : lorsque l'acteur central établira un plan optimal pour la totalité de la chaîne, cela signifie que les autres partenaires auront un cadre décisionnel bien délimité à suivre. Ils vont ainsi perdre une grande partie de leur autonomie, ce qui pourra nuire grandement à leurs intérêts et à leurs opportunités.

C'est ainsi que dans la réalité industrielle, une gestion centralisée des chaînes logistiques n'est observée que pour les entreprises multi-sites se composant de plusieurs entreprises appartenant juridiquement à une même entreprise mère. En ce qui concerne les autres types de chaînes logistiques, la planification est plutôt appréhendée en préservant l'aspect distribué de la chaîne. Ce type d'approches sera développé dans le paragraphe suivant.

## 1.2. Les approches distribuées

Ces approches exploitent en fait, le caractère distribué des chaînes logistiques. En effet, cette nature distribuée des chaînes logistiques a été mise en évidence dans plusieurs définitions. Nous citons, à titre d'exemple, celles données par [Lee et al., 93], [La londe et al., 94] et [Tayur et al., 99] que nous avons évoqués au chapitre précédent. Dans ce type d'approches, chaque entreprise de la chaîne est une entité indépendante qui peut mettre en œuvre sa propre politique de gestion et prendre ses décisions d'une manière autonome. Dans le but de satisfaire la demande du client final de la chaîne, chaque entreprise interagit avec ses partenaires directs, en échangeant des flux d'information et de matière. Ainsi, les informations sur les commandes seront transmises, de proche en proche, depuis la première entreprise qui est en liaison avec le client final jusqu'aux fournisseurs de matières premières. Chaque entreprise calcule ses propres besoins avant de propager l'information vers son amont. En contre partie, un flux physique (de matières première, de composant, etc.) sera généré du côté du fournisseur et orienté directement vers son aval. De cette façon, chaque entreprise appartenant à la chaîne établit des relations point-à-point, de type client-fournisseur, avec les entreprises qui sont directement vers son aval et vers son amont. De ce point de vue, une planification distribuée de toute la chaîne suppose ainsi d'exploiter d'une manière itérative des relations de type client-fournisseurs. Cela traduit une vision de type « bottom-up » dans laquelle l'analyse des interactions inter-entreprises permet d'adopter un point de vue global sur les mécanismes régissant le fonctionnement de la chaîne dans sa totalité [Galasso, 07].

L'étude des relations client-fournisseur constitue un champ de recherche important dans les approches distribuées. Parmi les problématiques traitées, nous distinguons l'amélioration du dialogue et de la collaboration entre clients et fournisseurs. Dans ce contexte, certains travaux ont eu recours à la simulation afin de pouvoir anticiper des situations futures et intégrer les contraintes des autres acteurs ([Telle, 03] ; [Parrod, 05]). Dans ce même contexte, Despontin-Monsarrat propose une méthode permettant de favoriser la coopération inter-entreprises dans un contexte de production à la commande. A l'aide d'un ensemble de négociations points-à-points entre des couples de partenaires formant des relations client-fournisseur, l'auteur permet de construire un cadre de décision commun facilitant une prise de décision collaborative [Despontin-Monsarrat, 04].

En outre, l'utilisation des systèmes multi-agents (SMA) est de plus en plus répandue pour modéliser et étudier les aspects de coordination par la négociation des acteurs d'une chaîne logistique. Dans ce contexte, un état de l'art général sur l'application des SMA dans des problématiques de gestion de chaînes logistiques peut être consulté dans l'ouvrage de Chaib-Draa et Muller [Chaib-Draa et al., 06]. Dans ce même cadre, Nissen se base sur les processus d'achats clients et d'accomplissement des ordres de vente pour proposer une

modélisation de la gestion de la chaîne logistique sous forme de fédération d'agents [Nissen, 02]. Pour Archimède et al., c'est la planification et l'ordonnancement de la production dans un contexte multi-sites qui sont abordés. Ces auteurs utilisent un SMA dont les agents établissent une communication par des messages contenant des informations sur les quantités à produire. Un agent superviseur est introduit pour résoudre les conflits et s'assurer de la non violation des contraintes globales [Archimède et al., 03].

D'autres techniques issues du domaine de l'intelligence artificielle sont encore appliquées dans des approches distribuées pour la planification des chaînes logistiques. C'est le cas des réseaux de neurones dont l'application dans des problématiques de gestion de chaînes logistiques est relativement récente comme le souligne Leung dans son ouvrage [Leung, 95]. Dans ce contexte, Cesarotti et al., ont utilisé les réseaux de neurones pour concevoir un processus de planification afin de répartir les composants en catégories présentant des prévisions de demande d'approvisionnement similaires [Cesarotti et al., 99]. De même, Rabelo et al., font recours aux réseaux de neurones en vue de l'identification et l'étude des changements du comportement de la chaîne logistique dans le but d'améliorer sa performance [Rabelo et al., 04].

Les approches distribuées sont beaucoup utilisées dans les situations actuelles de gestion inter-entreprises [François, 07]. Elles présentent, en fait, deux avantages majeurs par rapport aux approches centralisées. D'une part, elles permettent de diminuer le volume de données à manipuler dans chaque processus de résolution, ce qui facilite leur mise en œuvre. D'autre part, elles garantissent une autonomie locale pour chaque entité de la chaîne permettant ainsi d'accroître la réactivité face aux aléas locaux. Toutefois, ces approches ont le défaut d'intensifier les variations de la demande (effet Bullwhip) au fur et à mesure de l'éloignement du client final. En plus, le manque de visibilité globale sur la demande engendre une mauvaise gestion de l'incertitude sur cette dernière d'où une moins bonne réactivité face à une demande susceptible de fluctuer par rapport aux approches centralisées. C'est ainsi que les nouvelles tendances de recherche sur la planification des chaînes logistiques s'orientent plutôt à la recherche d'un bon compromis entre centralisation et coopération. C'est dans ce contexte que se placent les approches mixtes que nous abordons dans le paragraphe suivant.

### **1.3. Les approches hiérarchisées ou mixtes**

Les approches mixtes se placent entre les approches centralisées et distribuées. Elles représentent, en fait, une combinaison de ces deux approches dans le but d'assurer le meilleur compromis entre l'optimisation globale de la chaîne et le respect de l'autonomie locale des entités qui la constituent. En outre, de telles approches reflètent une réalité du terrain, dans le sens où, selon Galasso, « *les entités appartenant à une chaîne logistique doivent toujours composer avec des relations de pouvoir relevant d'un caractère hiérarchique* » [Galasso, 07]. Ces approches se fondent sur une modélisation multi-niveaux de la chaîne logistique. Dans ce contexte, Lecompte-Alix et Bourrières et al., ont fait une distinction de deux types de relations entre des clients et des fournisseurs dans un cadre de production s'appuyant sur des ressources internes. Les deux relations identifiées sont des relations hiérarchiques et des relations coopératives. Pour les formaliser, les auteurs

ont proposés un modèle de décision générique qui pourra être dupliqué au niveau de chaque centre décisionnel [Lecompte-Alix, 01], [Bourrières et al., 01].

De même, dans leurs travaux concernant l'ensemble du réseau d'entreprises formant une chaîne logistique, Le Quéré et al., proposent trois types différents de modélisations d'un système décisionnel. Ainsi, ils mettent en évidence les trois modèles suivants [Le Quéré et al., 03] :

- Le modèle hiérarchique : s'articule autour d'un centre de décision hiérarchiquement supérieur qui assure la coordination et la cohérence des décisions prises sur la totalité du réseau,
- Le modèle coordonné : il se base sur plusieurs centres de décision. Chaque centre décisionnel est le supérieur hiérarchique d'un sous-ensemble du réseau dont il doit planifier et coordonner l'activité. Afin de gérer tout le réseau, les centres décisionnels doivent communiquer entre eux afin de coordonner et garantir la cohésion de leurs décisions.
- Le modèle hétérarchique : il se fonde sur des relations directes entre les centres de décision. Ce modèle présente l'avantage d'accroître la réactivité de la planification du réseau. En effet, il n'existe pas un niveau hiérarchique supérieur auquel les centres décisionnels doivent se référer dans le cas de traitement d'un aléa ou d'un dysfonctionnement inattendu. Cependant, une telle modélisation diminue la coordination des décisions au niveau global, puisque celles-ci sont prises avec une vision locale au centre de décision.

Un même découpage des niveaux décisionnels que celui proposé par Le Quéré et al., a été présenté par François [François, 07] et [François et al., 06]. Cet auteur introduit différents degrés de hiérarchisation de la prise de décisions pour le pilotage de chaîne logistique. Toutefois, l'approche proposée se distingue de celle de Le Quéré par le fait d'insister sur la nécessité de mettre en œuvre des mécanismes d'agrégation et de désagrégation des informations échangées entre les centres de décisions locaux et ceux du niveau hiérarchique supérieur. Dans ce contexte, les mécanismes d'agrégation et de désagrégation constituent une des problématiques importantes dans les approches multi-niveaux de pilotage de systèmes complexes ([Miller, 01], [Fontan et al., 05]). Mercé et al., en distinguent deux formes [Mercé et al. 01]. La première forme, concerne l'agrégation logique permettant de regrouper en une seule entité agrégée un ensemble d'objets qui ne se différencient que par un nombre réduit de particularités jugées secondaires. Quand à la deuxième forme, elle représente l'agrégation physique qui rassemble en un tout indissociable un ensemble d'objets hétérogènes.

Au cours de notre travail de thèse, nous allons adopter le point de vue d'un modèle décisionnel hétérarchique. Il nous semble qu'une telle modélisation permet, d'une part, de refléter une réalité dans le cas de chaînes logistiques formées par des entreprises qui sont juridiquement indépendantes ; et d'autre part, de favoriser la réactivité décisionnelle face à un environnement industriel et économique fluctuant. Dans ce cadre, notre position est partagée avec celle adoptée par Galasso dans ses travaux [Galasso, 07]. En effet, dans le

cadre du projet EPML PIChaLog<sup>1</sup>, Galasso a présenté des études de cas réels qui ont été menées auprès de 10 entreprises (3 grandes entreprises et 7 PME) travaillant dans l'industrie aéronautique et appartenant à des chaînes logistiques réalisant des produits finis pour des clients distincts. Les études de cas ont été conduites via des entrevues avec des décideurs responsables logistiques. A la fin de son investigation, Galasso a affirmé l'observation suivante [Galasso, 07] :

*« nous n'avons jamais identifié dans les chaînes logistiques sur lesquelles a porté notre étude, de leader qui assumerait un rôle de gestion pour l'ensemble du réseau, totalement ou même partiellement. Les seules interventions d'une entreprise dans la gestion d'une autre étaient en effet réservées à des actions ponctuelles (approvisionnements de matières premières) ».*

Ainsi, nous partageons le même point de vue que celui de Galasso. Dans cette perspective, une approche hétérarchique pour la planification d'une chaîne logistique nous conduit à étudier des relations point-à-point, de type client-fournisseur, entre un centre de décision et les entités de la chaînes auxquelles il est en interaction directe. L'idée est de proposer un modèle de décision générique qui pourra être dupliqué sur les différents centres décisionnels présents dans la chaîne logistique. La formalisation mathématique de cette modélisation est détaillée au chapitre suivant. Elle se focalise sur l'étude d'une structure en réseau à partir d'un maillon d'une chaîne logistique que nous développons encore au chapitre suivant. Le modèle décisionnel que nous proposons a pour objectifs de bien intégrer les relations qui lient le centre de décision considéré avec ses partenaires directs (fournisseurs, sous-traitants, etc.) et d'avoir la capacité de réagir face aux fluctuations de l'environnement (économique, technique, etc.). En effet, faire face aux concepts émergents d'incertitude, de perturbation et de risque correspond aux problématiques actuelles dans le contexte de planification de chaînes logistiques. La tendance des travaux actuels sur ce domaine est de prendre en compte la réactivité de la chaîne lors de l'élaboration du processus de planification. Ainsi, dans la partie suivante, nous proposons d'étudier ces concepts avant de faire une revue sur la notion de réactivité et sa mise en œuvre dans le contexte industriel.

## **2. Risque, incertitude et perturbation dans la planification des chaînes logistiques**

Dans cette partie, nous abordons les concepts d'incertitude, de perturbation et de risque dans le contexte de planification des chaînes logistiques. Nous commençons par définir ces concepts tout en essayant de dégager les liens possibles entre eux. Ensuite, nous développons la typologie des risques et des incertitudes touchant la chaîne logistique selon des travaux issues de la littérature dans ce domaine. Enfin, nous nous intéressons à la modélisation des incertitudes dans des travaux s'y rapportant à la planification de chaînes logistique.

---

<sup>1</sup> EPML PIChaLog : Équipe Projet Multi-Laboratoire « Pilotage Intégré de la Chaîne Logistique » visant le développement de méthodes, modèles et outils d'aide à la décision et à la négociation intégrant la nature distribuée de centres de décision associés à des entités coopératives et concurrentielles. Laboratoires concernés :le CERTOP, laboratoire du CNRS rattaché à l'université Toulouse 2 Le Mirail ; le LAAS, laboratoire du CNRS ; le LAPS, laboratoire du CNRS ; le LGP, laboratoire de l'ENI de Tarbes.

## 2.1. Définitions

Plusieurs définitions de la notion de risque sont rencontrées dans la littérature scientifique. La grande partie de ces définitions met en relief le lien entre risque et probabilité comme le souligne Trkman et McCormack [Trkman et al., 09] en admettant que « *la plupart des définitions du risque ont ceci en commun : la probabilité de la survenance d'un événement particulier ou d'un résultat* ».

Historiquement, c'est le mathématicien suisse Daniel Bernoulli qui a formulé en 1738 l'une des premières définitions scientifiques de la notion de risque en le considérant comme étant « *l'espérance mathématique d'une fonction de probabilité d'événements* ».

Dans sa thèse de doctorat, Mahmoudi [Mahmoudi, 06] rapporte la définition que donne l'académie anglaise (the Royal society) à la notion de risque en le présentant comme la « *probabilité qu'un événement nuisible particulier apparaisse durant une période de temps donnée, ou qu'il résulte d'un défi particulier* ».

Desroches et al. [Desroches et al., 03] perçoivent le risque comme une « *probabilité d'occurrence d'un événement redouté* ». Dans leur définition, ils désignent par « événement redouté » tout événement « non désiré entraînant l'exposition au danger ». En plus, ils qualifient comme « *facteur de risque* », « *tous les dangers et leurs origines* » et définissent la « *criticité du risque* » par une « *mesure de la gravité des conséquences de cet événement en termes de dégâts* ».

Dans le même contexte et ayant une attention particulière envers l'entreprise, Lemette [Lemette, 08] caractérise le risque comme la « *probabilité d'occurrence d'un événement, interne ou externe à un système, qui viendrait menacer les activités de l'entreprise, prise au sens d'un système complexe, et entraver l'atteinte de ses objectifs opérationnels, stratégiques et financiers, menaçant in fine son chiffre d'affaires et sa rentabilité* ».

Les définitions déjà évoquées abordent la notion de risque avec une manière négative, dans le sens où elles associent le risque aux dommages et aux préjudices. Contrairement à cette vision, Gourc [Gourc, 99] met le relief sur l'autre facette du risque pour le qualifier positivement comme un facteur d'opportunité : « *oser pour gagner* » qu'il appelle le « *risque action* », contrairement au risque négatif, créateur de dégât, qui le désigne par « *risque-écueil* ». Selon cette même logique, Bougaret [Bougaret, 02] désigne par « *risque spéculatif* » le risque qui offre une possibilité de gain.

En ce qui concerne la notion d'incertitude, Galbraith la définit comme « *la différence entre la quantité d'information nécessaire pour effectuer une tâche et la quantité d'information dont on dispose déjà* » [Galbraith, 73]. Toutefois, entre le concept « d'incertitude » et celui de « risque » nous pourrions relever beaucoup de confusion en ce qui concerne la littérature scientifique. C'est ainsi que Tang et Musa [Tang et al., 10] énoncent que « *il n'est pas évident de distinguer entre risque et incertitude, en particulier en gestion de chaînes logistiques* ». Dans cette optique, les deux auteurs ont essayé de différencier les deux concepts dans le contexte de gestion de chaîne logistique. Ils énoncent alors que « *le risque est parfois interprété comme des ressources peu fiables et incertaines* ».

*qui créent des interruptions dans la chaîne logistique alors que l'incertitude peut être expliqué par le risque d'appariement entre l'approvisionnement et la demande dans le processus de chaîne logistique».*

De même, Galasso et Thierry [Galasso et al., 09] affirment que « *il est indéniable que les concepts d'incertitude et de risque sont liés, même s'il est parfois difficile de percevoir ce lien* ». De même, Holton définit le risque comme « *une combinaison de deux principaux éléments : l'exposition et l'incertitude* » pour dire ainsi que « *le risque est une exposition à une proposition (ou un fait) que l'on est incertain* » [Holton, 04].

Cependant, en théorie de la décision, une distinction nette est effectuée entre « décision sous risque » et « décision sous incertitude ». Dans ce contexte, le terme décision sous risque est utilisé si des probabilités sont associées aux événements, sinon, c'est le terme décision sous incertitude qui est utilisé [Lang, 03]. Selon cette même logique, Mahmoudi [Mahmoudi, 06] définit « *la situation de risque... par une distribution de probabilité objective définie par la nature même du problème et non les évaluations personnelles (subjectives) de la situation par les décideurs.* ». Cependant, en réalité, les décideurs disposent rarement de ce genre de lois de la nature. Dans tel cas, les décideurs se comportent comme si des probabilités étaient associées aux états de la nature pour prendre des décisions (théorie des probabilités subjectives [Savage, 54]).

Pour ce qui est de la notion de perturbation, nous avons cerné plusieurs définitions. Une première définition, issue de l'automatique, est donnée par Chilque et al : « *Nous définissons les perturbations comme des événements liés à des changements d'états logiques ou traduisant des dérives de paramètres du système ou de son environnement* » [Chilique et al. 93].

Pellet dans sa thèse de doctorat (1985) désigne par perturbation « *toute information qui contredit une prévision faite aussi bien sur le fonctionnement du système opérant que sur l'évolution des objectifs élaborés à partir de la prévision de l'évolution de l'environnement* » [Pellet, 85]. Avec une logique différente, Baillet considère une perturbation comme une association cause-effet [Baillet, 94]. Elle juge que l'observation d'une perturbation n'est autre que l'observation de l'effet négatif d'une cause associée. Dans ce contexte, elle donne l'exemple d'une pièce usée qui sera la cause d'une panne machine.

A la fin de cette revue des définitions, nous estimons pouvoir nous positionner et proposer notre point de vue concernant les trois concepts étudiés. En ce qui concerne le risque, nous adoptons la terminologie donnée par Desroches et al. [Desroches et al., 03]. Quand à la notion d'incertitude, nous admettons que c'est une information prévisionnelle qui est susceptible de varier. Toutefois, nous n'avons aucun schéma permettant de prévoir, ni le moment de sa variation, ni l'intensité exacte de cette variation. Selon la terminologie de Desroches et al., [Desroches et al., 03], nous considérons que l'incertitude est un facteur de risque. A titre d'exemple, une demande incertaine est un facteur de risque de non satisfaction du client. Pour ce qui est de la notion de perturbation, nous optons pour le point de vue de Baillet, en considérant qu'une perturbation serait assimilée à l'effet négatif observé.

Dans ce qui suit, nous essayons de cerner les risques et les incertitudes qui sont généralement prises en compte dans le contexte de chaîne logistique.

## 2.2. Typologie des risques et incertitudes dans les chaînes logistiques

Dans la littérature, plusieurs typologies des risques ont été présentées. Dans ce cadre, [Shi, 04] propose de distinguer entre :

- a) *risque du marché* : se rapporte à la fluctuation des prix du marché
- b) *risque de crédit* : au sens de la décrédibilisation d'un acteur sur son marché
- c) *risque opérationnel* : lié aux erreurs techniques au niveau exécutif de la chaîne logistique,
- d) *risque de business* : résultant de la fluctuation de la demande client, des changements technologiques ou de l'émergence de compétiteurs.

[Xiaohui et al., 06] se focalisent sur les relations entre les acteurs de la chaîne et les différents flux dans lesquels ils sont impliqués pour proposer les risques suivants :

- a) *risques liés au flux matière et au transport* : fluctuation du niveau de stocks à cause de l'incertitude sur la demande et les approvisionnements, etc.
- b) *risques liés au flux d'information* : imprécision des prévisions de ventes et distorsion de l'information, etc.
- c) *risques liés au flux financiers* : fluctuation des prix,
- d) *risques liés à la relation partenariale* : mauvaise alliance
- e) *risques impondérables* : catastrophes ou accidents.

En ce qui concerne [Hallikas et al., 04], ils identifient :

- a) *risques liés à la demande* : tendance du marché, perte de positionnement de l'entreprise,
- b) *risques liés aux livraisons* : non-qualité, non-ponctualité,
- c) les *risques liés aux coûts* : inadéquation de l'investissement,
- d) les *risques liés aux ressources* et à leur *flexibilité* quant à leur aptitude à répondre aux variations du marché.

D'une manière plus générale, [Christopher, 05] distingue :

- a) *risques liés à la demande*,
- b) *risques liés à l'approvisionnement*,
- c) *risques liés au processus de production lui-même*,
- d) *risques liés au contrôle/ pilotage de l'activité de production*,
- e) *risques liés à l'environnement*.

Dans sa thèse de doctorat, Amrani-Zougar s'appuie sur les travaux de [Christopher, 05] et [Xiaohui et al., 06] pour identifier et classer les événements redoutés (ER) selon

une typologie qui se base sur la nature des processus auxquels ils se rapportent. Elle distingue ainsi les ER liés :

- a) au processus d'approvisionnement,
- b) au processus de production interne,
- c) au traitement de la demande (facteur de déclenchement du processus de réalisation de la commande),
- d) au processus de pilotage (planification et coordination des décisions conjointes de production et d'approvisionnement),
- e) et à l'environnement (englobant les considérations des cours des produits, situation du marché, etc.).

En plus, elle met en évidence deux catégories d'événements redoutés (ER) qui sont les :

- a) ER endogènes : internes au partenaire, « ne sont observables qu'en internes par les partenaires (clients et fournisseurs) et n'ont pas systématiquement d'incidence sur les partenaires externes, traités la plupart du temps par des actions correctives internes. Entre autres un ER endogène peut avoir une incidence sur les partenaires aval (ex : rupture du stock chez fournisseur peut affecter le client) » [Amrani-Zouggar, 09],
- b) ER exogènes : externes au partenaire.

En se focalisant plutôt sur le concept d'incertitude, Peidro et al., présentent une revue remarquable des modèles quantitatifs pour la planification des chaînes logistiques sous incertitude. Dans leur travail [Peidro et al., 09], les auteurs distinguent essentiellement 3 groupes de sources d'incertitude :

- a) Demande : présentée comme la plus importante source d'incertitude selon Davis [Davis, 93], causée par une demande volatile ou des prévisions de demandes inexactes.
- b) Processus de fabrication : cette source d'incertitude est due à une faible fiabilité du processus de production ayant pour cause, par exemple, des pannes machines.
- c) Approvisionnement : ce type d'incertitude est entraîné par la variation qui peut affecter le mode opératoire du fournisseur et qui aura pour résultat des défauts de fabrication ou des retards de livraison.

La synthèse de Peidro et al., est intéressante. Nous y revenons plus en détail dans la suite de notre document. En ce qui concerne notre travail, nous nous concentrons sur les problématiques se rapportant à la planification de chaînes logistiques sous incertitudes. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les grandes lignes de la prise en compte de l'incertitude par la modélisation. En particulier, nous nous attachons aux travaux de la modélisation de l'incertitude sur la demande.

## 2.3. Modélisation de l'incertitude en planification des chaînes logistiques.

L'étude de la planification de chaînes logistiques sous incertitude est un champ de recherche assez récent. Toutefois, l'importance des travaux se consacrant à ce domaine représente un signe marquant de l'intérêt et de l'importance qu'accorde la communauté scientifique à cette thématique de recherche. Dans ce cadre, la revue des modèles quantitatifs pour la planification des chaînes logistiques, réalisée par Peidro et al., en l'année 2009, constitue une analyse approfondie récente de l'état de l'art consacré à ce domaine [Peidro et al. 09]. Nous avons jugé qu'il est intéressant de présenter les grands axes de cette étude et de bien mettre en évidence les constatations tirées. Ces dernières, vont orienter la modélisation de notre approche dans la suite de notre travail.

Dans ce travail, Peidro et al., ont étudié 103 références bibliographiques qui s'étale entre 1988 et 2007. Les auteurs ont défini une nouvelle taxonomie pour classer les modèles analysés. La taxonomie présentée identifie trois dimensions:

- a) la source d'incertitude que le modèle traite,
- b) le type de problème traité dans la planification
- c) l'approche de modélisation utilisée.

En ce qui concerne la dimension (a), comme nous l'avons indiqué au paragraphe précédent, les auteurs distinguent essentiellement 3 sources d'incertitude : la demande, le processus de fabrication et l'approvisionnement. Pour ce qui est de la dimension (b), trois types de problèmes sont retenus : les problèmes stratégiques, les problèmes tactiques et les problèmes opérationnels. Enfin, la dimension (c) met en évidence quatre types de modèles :

- Modèles analytiques : optimisation robuste, programmation stochastique, théorie des jeux, programmation linéaire et paramétrique,
- Modèles d'intelligence artificielle : systèmes multi-agents, programmation linéaire floue, programmation multi-objectifs floue, apprentissage par renforcement, algorithmes génétiques,
- Modèle de simulation : simulation à événements discrets et systèmes dynamiques,
- Modèles hybrides : combinant des modèles analytiques et la simulation soit programmation linéaire et simulation, commande prédictive, programmation stochastique dynamique, MILP et simulation à événements discrets, algorithmes génétiques et simulation.

Les auteurs ont utilisé leur taxonomie dans le but de classer les 103 références et de pouvoir, par la suite, tirer des constatations via l'analyse de la répartition des références étudiées sur les trois dimensions déjà évoquées. Les éléments suivants ont été alors établis :

- Plus de la moitié des références (59,22%) n'incluent qu'une seule source d'incertitude alors que moins de 10% des modèles étudiés incorporent les 3 sources d'incertitude à la fois et moins que 30% considèrent seulement 2 sources d'incertitude;

- Le type d'incertitude le plus étudié est la demande (il a été cerné dans 85 références) ;
- Presque la moitié des références ont été consacrées à des problématiques de planification tactique ;
- Les modèles analytiques et ceux issus de l'intelligence artificielle sont les plus utilisés. Ils figurent, respectivement, dans 40 références et 30 références. Par contre, nous comptons, 19 références pour les modèles de simulation et 14 pour les modèles hybrides.

Les conclusions de Peidro et al., nous ont incité à essayer de proposer une modélisation qui permet de donner la possibilité de prendre en compte différentes sources d'incertitude ; même si dans notre travail, nous envisageons de considérer l'incertitude sur la demande seulement. En effet, selon ces auteurs, l'incertitude sur la demande est la plus fréquente. Ce même point de vue est partagé encore par Bartezzaghi et Vergnati qui considèrent que la bonne compréhension de la nature de la demande client finale est l'étape primordiale dans le processus global de gestion de l'incertitude [Bartezzaghi et al., 95]. Dans ce contexte, nous cernons plusieurs approches de modélisation d'une demande incertaine dans un processus de planification tactique de chaîne logistique.

Le recours à la modélisation stochastique est une des formes les plus répandue de l'intégration d'une demande incertaine. Dans ce type de modèle, la demande est généralement représentée par une distribution de probabilité. Toutefois, d'autres techniques sont encore utilisées comme les chaînes de Markov et les réseaux de files d'attente [Srinivasa Raghavan et al., 02]. Dans le cadre de la modélisation stochastique, nous citons les travaux de Pyke et Cohen. Dans un premier temps, ces auteurs ont présenté un modèle stochastique pour étudier la planification tactique d'un système intégré de production et de distribution composé d'un nœud de fabrication, un entrepôt de produits finis et un détaillant [Pyke et al., 93]. Par la suite, les mêmes auteurs ont considéré un réseau de production plus complexe. Ils ont proposé alors un nouveau modèle qui intègre des produits multiples et une demande stochastique. L'objectif de leur modèle était de minimiser le coût total de la production tout en respectant certaines contraintes sur le taux de service [Pyke et al., 94]. De même, Escudero et al., ont développé un modèle, multi-produits, multi-périodes et multi-niveaux basé sur la programmation stochastique. Ils ont conçu plusieurs scénari afin d'optimiser les processus de production, d'assemblage et de distribution dans une chaîne logistique en adoptant une demande incertaine [Escudero et al., 99]. Plus récemment, Sodhi et Tang, ont réalisé une extension d'un modèle déterministe basé sur la programmation linéaire pour la planification de la chaîne logistique en intégrant de l'incertitude sur la demande et les flux de trésorerie en ce qui concerne le moyen terme. Le modèle résultant est un programme linéaire stochastique [Sodhi et al., 09].

Un autre type d'approches utilisé pour la modélisation d'une demande incertaine se manifeste via le recours à la logique floue. Dans ce cadre, certains auteurs préfèrent les modèles flous aux modèles stochastiques, car ils permettent d'éviter la difficulté de détermination des densités de probabilité. Ainsi, la logique floue offre la possibilité de réaliser une représentation plus intuitive de l'incertitude, en associant aux paramètres incertains des ensembles flous [La, 04]. Dans ce contexte, Chen et al., ont mis en place une

approche pour la planification de la production et la distribution dans une chaîne logistique. La planification implémentée concerne un problème multi-produits, multi-étapes et multi-périodes. Elle a pour objectifs de maximiser : les bénéfices de chaque participant dans la chaîne logistique, le niveau de service pour la clientèle et les niveaux de stock de sécurité. Le modèle a été élaboré sous la forme d'un programme non linéaire multi-objectifs et à valeurs entières. Sa résolution est assurée par une approche basée sur la théorie des ensembles flous [Chen et al. 03a], [Chen et al. 03b]. Selim et al., ont proposé une programmation floue orientée buts (Goal programming) pour la planification d'un problème de production-distribution collaboratives sous une demande incertaine. Leur modèle a été appliqué dans une chaîne logistique centralisée et distribuée. Les objectifs poursuivis correspondent à la maximisation des profits pour les fabricants et les centres de distribution, à la réduction des coûts du détaillant et les retards dans la demande des détaillants [Slim et al., 07].

Une troisième approche pour la modélisation de l'incertitude affectant la demande est l'utilisation de modèles par intervalles. Le principe général de ces modèles se traduit par le fait que chaque paramètre du problème étudié peut prendre sa valeur dans un intervalle de valeurs [La, 04]. Dans ce contexte, nous citons les travaux de Galasso, [Galasso, 07], [Galasso et al., 09]. Cet auteur a adopté la notion de demande flexible qui fournit à la fois une valeur provisoire de la demande et un intervalle de flexibilité dans lequel la valeur de cette demande est sujette à une possible évolution. En effet, cet intervalle délimite la variation maximale à laquelle le fournisseur devra être capable de s'adapter. En contre-partie, un horizon ferme est défini pour intégrer une demande ferme dont la valeur est fixe. Par la suite, différentes stratégies de planification sont proposées au décideur afin de l'aider à mieux faire face à l'incertitude et d'accroître sa visibilité de la demande. Une stratégie « *myope* » consiste à mener une planification sur la seule base des demandes fermes. Une stratégie optimiste permet d'intégrer, en plus des demandes fermes, la valeur maximale des demandes flexibles. Une stratégie pessimiste tient compte de la valeur minimale des demandes flexibles. Enfin, une stratégie intermédiaire consiste à considérer la moyenne des valeurs de demande flexible.

Un dernier type d'approche que nous abordons dans ce paragraphe, se manifeste par la mise en œuvre d'une planification à horizon glissant basée sur un rafraîchissement et une actualisation périodique des plans. Dans ces approches, l'adapter aux variations de la demande se fait via une remise en cause périodique des plans élaborés et une prise en compte des nouvelles informations concernant les données et les décisions engagées. Dans ce cadre, Landeghem et Vanmaele ont effectué une étude visant à comprendre les phénomènes causant de l'incertitude dans la gestion de la chaîne logistique afin d'y apporter une réponse. Leur but était en fait de réduire la périodicité de réactualisation des plans de production via la réduction des causes d'incertitude [Landeghem et al., 02]. Avec une approche similaire, Genin a élaboré une méthode pour la planification tactique des chaînes logistiques qui se fonde sur le concept de plan de référence pour définir la périodicité de planification. Cette méthode a été intégrée au sein d'un outil de planification avancée (APS). En fonction des simulations menées, il a montré que sa méthode a un effet important sur la réduction de l'effet Bullwhip [Genin, 03], [Genin et al, 07], [Genin et al, 08].

Toutes ces approches, permettent de modéliser une demande incertaine et l'inclure dans le processus de planification. Ainsi, ces approches offrent au décideur la possibilité d'adapter la demande prévisionnelle qui provient de ses clients ou de ses services commerciaux. En ce qui concerne notre travail, nous nous orientons plutôt vers les deux dernières approches. En fait, nous comptons prendre en compte l'incertitude sur la demande via l'utilisation d'une demande prévisionnelle pouvant varier dans un intervalle borné. La poursuite de l'évolution de la demande réelle se fera selon un processus dynamique de planification permettant une réactualisation périodique des plans comme nous le détaillons dans le chapitre suivant.

A ce niveau d'étude, se doter d'une capacité pour faire face à l'incertitude touchant la demande ou n'importe quel paramètre dans le problème de planification, c'est en quelque sorte, accroître sa capacité de réactivité. En fait, « *incertitude et besoin de réactivité sont étroitement liés* » [Galasso, 07]. En plus, un contexte incertain pose un autre type de problématique dans la littérature scientifique, aussi important que celle de la réactivité. Nous parlons ici de la robustesse des plans. Dans le paragraphe suivant, nous allons développer ces deux concepts et présenter des travaux correspondants dans le cadre de la planification de chaîne logistique. Notre objectif, étant alors, de proposer une approche de planification réactive et robuste à la fin de ce chapitre.

### **3. Planification réactive et robuste : éléments de problématique**

#### **3.1. La notion de réactivité**

##### **3.1.1. Définitions**

La littérature scientifique nous fournit plusieurs définitions consacrées au concept de la réactivité. D'une manière très générale, le terme réactivité est synonyme de la capacité de répondre à une sollicitation. Dans le contexte industriel, « *La réactivité industrielle est en général comprise comme une capacité à s'adapter à des aléas, qu'ils soient internes, ou externes* » [Caillaud et al, 01]. Dans la même logique, Baillet exprime que « *La réactivité, c'est la capacité du système à répondre à une stimulation d'un agent extérieur, c'est-à-dire à une stimulation de son environnement.* » [Baillet, 94]. Certains auteurs distinguent entre préactivité et proactivité. Ainsi, selon Godet, la « *préactivité est définie comme étant la préparation à un changement prévisible, tandis que la proactivité est définie comme une action en vue de provoquer un changement souhaité* » [Godet, 97].

Nous distinguons d'autres définitions qui permettent d'inclure le caractère temporel. Dans ce cadre, « *la réactivité, c'est la capacité du système à élaborer une solution admissible face à un aléa, dans un délai suffisant par rapport à la dynamique de son environnement* » [Baillet 94]. Selon la même vision, Le Quéré et al., mettent en relief le caractère multidimensionnel de la réactivité. Ils présentent le concept comme suit [Le Quéré et al., 03] :

- « *C'est le temps total entre la détection d'un événement inattendu et le temps pour appliquer la modification adéquate* »,

- « *Il est aussi important de prendre en considération la qualité de la modification appliquée en terme de temps d'immobilisation du système* ».

Il est clair que cette dernière définition de Le Quéré et al., sous entend que le temps nécessaire à appliquer une modification pour faire face à l'occurrence d'un événement inattendu pourra être vu comme un moyen de mesure de la réactivité. Cette idée est partagée par Galasso [Galasso, 07], toutefois, ce dernier ajoute encore qu'« *une chaîne sera réactive si les modifications nécessaires pour pallier un événement imprévu entraînent des variations mineures dans les coûts des plans résultant* » [Galasso, 07]. Ainsi, la variation du coût est considérée comme une mesure possible de la réactivité. En fait, le coût du plan n'est autre qu'un indicateur de performance de la chaîne parmi d'autres. Donc, en adoptant le point de vue de Galasso, nous généralisons que tout indicateur de performance de la chaîne logistique pourra être utilisé pour mesurer sa réactivité. Dans ce sens, nous pourrions alors énoncer, avec les mêmes termes que Galasso, qu'une *chaîne sera réactive si les modifications nécessaires pour pallier un événement imprévu entraînent des variations mineures dans les valeurs de(des)indicateur(s) de performance choisi(s) par le décideur*. Dans ce contexte, la satisfaction du client pourra être utilisée pour mesurer la réactivité de la chaîne. Un peu plus loin dans ce paragraphe, nous passons en revue les indicateurs de mesure de performance dans la chaîne logistique et nous précisons ceux que nous avons choisi d'utiliser dans la suite de notre travail.

En tenant compte de tous ce que nous avons présenté dans ce paragraphe, nous proposons notre propre définition de la notion de réactivité. Selon notre point de vue, ***la réactivité est la capacité d'un système à détecter les variations affectant ses éléments internes et/ou son environnement externe et d'engager une action corrective permettant d'atténuer ou d'éliminer l'effet de ces variations, sans que ces actions ne dégradent fortement les indicateurs de performance ciblés par le décideur***. Dans cette définition, nous insistons sur l'importance des mécanismes de détection des variations internes ou externes au système. De même, nous pensons que la capacité de réagir pour elle seule n'aura pas d'importance si son résultat va dégrader d'une manière significative la performance du système, ciblée par le décideur. En fait, ce dernier point est complètement en cohérence avec les systèmes de production et les chaînes logistiques dont la finalité essentielle est de garder un niveau de performance compétitif dans un environnement économique très concurrentiel. Dans ce contexte, nous cernons des pratiques industrielles classiques qui sont mises en place pour accroître la réactivité de l'entreprise manufacturière. Dans le paragraphe suivant, nous détaillons quelques pratiques se rapportant essentiellement à des variations de la demande.

### **3.1.2. Pratiques classiques pour favoriser la réactivité**

La littérature fait apparaître quelques pratiques industrielles, classiquement utilisées pour se prémunir contre les variations possibles de la demande. Dans ce contexte, nous cernons une catégorie d'approches qui s'appuient sur le principe d'une introduction des marges dans la planification. Ce type d'approches a été appliqué dans différents cadres tels que le dimensionnement des marges temporelles [Whybark et al., 76], le dimensionnement des stocks de sécurité [Krupp, 97], l'amélioration de la politique de lotissement [Ho et al. 98], [Brennan et al.,93]. Parmi les exemples cités, le dimensionnement des stocks de sécurité dans un contexte de planification tactique selon

l'approche MRP a suscité un grand intérêt. Dans ce cadre, Guide et al., ont proposé un état de l'art [Guide et al., 00]. Dans leur étude, ces auteurs ont conclu que des méthodes présentées pour le dimensionnement du stock de sécurité sont presque à un même niveau de performance. Une autre constatation, se rapportant aux stocks a été mise en évidence dans certains autres travaux [Bartezzaghi et al., 95], [Gupta et al., 03]. Dans ce contexte, il est établi que la diminution de l'impact de l'augmentation du niveau de stock peut être liée à une évolution de la demande et la standardisation des composants. En effet, ces auteurs ont constaté que même dans le cas d'une demande irrégulière, les surstocks qui sont créés pour faire face à une variation d'une commande donnée, peuvent être absorbés par d'autres commandes.

Toutefois, avec les changements accrus dans les caractéristiques du marché et le comportement du consommateur, les stocks de sécurité ne sont plus une solution envisageable dans une production qui devient de plus en plus spécialisée. Les décideurs se sont orientés alors vers des approches permettant de modéliser l'incertitude et l'intégrer dans le processus de planification. Ces approches ont la capacité de fournir des plans adaptés à l'incertitude prise en compte, et constituent ainsi, un support d'aide à la décision pour les décideurs et les managers. En effet, ces nouvelles approches ont été détaillées dans le paragraphe (2.3).

Ainsi, dans le contexte de la planification, l'incertitude crée un besoin de réactivité ; mais encore, elle laisse surgir un autre concept, qui est aussi étudié que le premier : nous parlons de la robustesse. Dans ce qui suit, nous nous proposons d'éclaircir certains aspects se rapportant à cette notion.

## 3.2. La notion de robustesse

### 3.2.1. Définitions

Enoncer une même définition de la notion de « robustesse », est loin d'être un objet de consensus au sein des différentes disciplines utilisant ce terme. Dans cette vision, Philippe Vincke affirme que « *il n'y a pas de définition unique de robustesse qui a été acceptée par la communauté scientifique jusqu'à maintenant et c'est assez naturel: la diversité des situations est si grande...* » [Vincke, 03]. En effet, dans la littérature, nous distinguons plusieurs définitions qui sont issues de plusieurs disciplines telles que les statistiques, l'automatique aussi bien que l'informatique et la recherche opérationnelle. Toutefois, ces définitions présentent un élément commun en associant généralement la notion de « robustesse » à celle de l'incertitude, du risque et de prise de décision [Kleijnen, 03].

En statistique, le terme « robuste » a été pour la première fois introduit par G.E.P. Box en 1953. Dans ce contexte, « *la robustesse d'un estimateur<sup>2</sup> est sa capacité à ne pas être modifié par une petite modification dans les données ou dans les paramètres du modèle choisi pour l'estimation* » [Box, 53]. De même, Huber dans [Huber, 81] définit la robustesse comme « *une insensibilité à toutes déviations par rapport aux hypothèses* ». Ainsi, la

---

<sup>2</sup> En statistique inférentielle, un estimateur est une valeur calculée sur un échantillon et que l'on espère être une bonne évaluation de la valeur que l'on aurait calculée sur la population totale.

robustesse, en statistiques, qualifie le plus souvent la résistance de l'estimation aux données aberrantes et fluctuantes.

En recherche opérationnelle, et spécialement dans des problématiques relatives à la programmation mathématique et l'aide à la décision, la notion de robustesse a été abordée par plusieurs auteurs ([Bertsimas et al., 04], [Roy, 98], [Roy 04], [Roy 05]). Dans ce contexte, Bertsimas et Sim annoncent que « *le paradigme classique en programmation mathématique est de développer un modèle qui suppose que les données d'entrée sont connues et égales à leur valeur nominale. Cependant, cette approche ne prend pas en compte l'effet des incertitudes sur ces données qui influence la qualité et la faisabilité du modèle. Il est en effet possible que les valeurs des données diffèrent de leur valeur nominale, induisant ainsi le viol de plusieurs contraintes, et rendant la solution optimale trouvée à partir des valeurs nominales, de mauvaise qualité, voire infaisable. Cette constatation montre l'intérêt de concevoir des approches de résolution qui soient insensibles aux incertitudes, c'est-à-dire robustes.* » [Bertsimas et al.,04]. Ainsi, Bertsimas et Sim définissent une approche de résolution robuste comme étant une approche insensible aux incertitudes sur les données du problème, dans le sens où, une telle approche permet de générer une solution ayant une performance proche de celle de la solution optimale malgré les variations des valeurs des données incertaines. Selon la même vision, Roy présente le terme **robuste** « *en tant que qualificatif se rapportant « à une aptitude à résister à des « à peu près » ou à des « zones d'ignorances » afin de se protéger d'impacts jugés regrettables (notamment dégradation de propriétés à préserver) »* [Roy, 05]. En outre, Roy s'est intéressé dans des problèmes de décision, à intégrer les éventuelles incertitudes qui peuvent affecter les paramètres de ce problème afin d'élaborer des éléments de réponses robustes qu'il appelle des conclusions robustes [Roy, 98], [Durieux et al., 03]. De même, Dans la théorie de la décision, Pomerol préconise que « *l'action la plus robuste est celle qui ne conduit pas à une perte importante quelque soit l'événement qui va se produire* » [Pomerol, 01], [Durieux et al. 03].

En fait, l'idée de caractériser la robustesse d'un système par rapport à la variation des critères de performance ciblés, en présence des données incertaines, est très partagée par différentes disciplines. En effet, nous venons de cerner cette idée dans les définitions de la robustesse émanant des domaines de la théorie de la décision et de la programmation mathématique, présentées ci-dessus. Cette même vision est trouvée en automatique. Dans ce contexte, Oustaloup présente le concept de la manière suivante : « *Par robustesse, on entend la capacité d'une loi de commande à assurer un degré d'invariance des performances (au minimum la stabilité) du système commandé vis-à-vis d'imperfections de modélisation (incertitudes, approximations, réduction des modèles, etc.)* » [Oustaloup, 94]. Selon la même vision, Lee et Yu considèrent la robustesse comme étant « *relative aux résultats d'une ou plusieurs fonctions et de leur dispersion à paramètres et coûts incertains* » [Lee et al., 97b]. En s'intéressant spécialement aux systèmes de production, Chetouane présente la définition suivante [Chetouane, 99] : « *La robustesse d'un système de production est sa capacité à maintenir ses performances, face aux perturbations.* »

De même, Taguchi, le précurseur de l'application de la planification expérimentale au Japon, énonce que « *un système est dit robuste s'il permet d'obtenir une faible dispersion des performances cibles malgré les variations des paramètres non contrôlables* » [Taguchi 87]. Les paramètres non contrôlables sont considérés comme les sources d'incertitudes

dans un problème de décision. Un système est considéré robuste si la fonction mesurée ne s'écarte pas d'une valeur donnée d'une manière significative dans le cas de variation de paramètres. Genin dans sa thèse, s'appuie sur la définition de Taguchi pour définir la robustesse d'un plan de production : « *nous qualifions un plan de robuste si et seulement s'il fournit une faible dispersion de ses caractéristiques malgré les fluctuations perturbatrices des facteurs non-contrôlables* » [Genin, 03]. Il lie donc la robustesse d'un plan à la dispersion d'une ou plusieurs mesures de performances.

Il existe une autre vision différente de celles déjà énoncées pour définir la robustesse d'un plan. Zapfel et Roy énoncent que « *un plan tactique est robuste s'il permet de trouver un plan réalisable au problème de planification opérationnelle pour toutes les réalisations possibles de la demande* » [Zapfel, 98], [Roy, 98]. Dans cette même optique, et dans le contexte d'approches hiérarchisées, Mercé et Fontan définissent « *une décision agrégée est dite robuste si elle assure l'existence d'au moins une décision détaillée* » [Mercé et al. 01], [Fontan et al., 05].

Comme nous venons de présenter, plusieurs définitions existent pour caractériser la notion de robustesse. Chacune de ces définitions, reflète la vision de son auteur ainsi que la discipline à laquelle il appartient. Cependant, en adoptant une vision globale, deux constatations peuvent être tirées des définitions citées. Premièrement, l'idée de lier la robustesse d'un système à sa capacité de préserver une variation nulle ou petite de sa performance (telle qu'elle va être définie par les responsables) en face de l'incertitude, est dominante. Deuxièmement, en ce qui concerne les approches hiérarchisées, la notion de robustesse marque, plutôt, l'interaction entre une décision agrégée et la décision détaillée qui lui correspond. Ainsi, dans la suite de notre travail, nous allons tenir compte de ces deux aspects du concept de robustesse, notamment, en ce qui concerne l'approche hiérarchisée que nous développons.

Avant de détailler notre approche de planification réactive et robuste, dans le paragraphe suivant, nous allons nous intéresser aux approches utilisées pour favoriser la robustesse des systèmes. Nous nous focaliserons, essentiellement, sur celles qui ont été appliqués dans des problématiques de planification de système de production et de chaîne logistique.

### **3.2.2. Approches pour favoriser la robustesse de la planification**

La littérature scientifique nous permet de distinguer plusieurs approches pour assurer la robustesse d'un système face aux paramètres incertains. Ces approches sont appliquées dans des problématiques différentes, notamment, celle concernant la planification tactique.

Nous commençons par présenter l'approche la plus connue auprès des industriels, qui est la méthode de Taguchi. Cette méthode a été élaborée dans les années 50. Elle distingue, pour le système étudié, entre les « facteurs externes non contrôlables » appelés encore « des facteurs bruits » et les « facteurs contrôlables ». La méthode consiste alors à ajuster les facteurs contrôlables (facteurs de conception) de telle sorte que les performances du système soient insensibles aux variations des facteurs incontrôlables (facteurs bruits non maîtrisables ou souffrant d'un manque de précision) [Taguchi, 87],

[Lim et al. 96]. Dans ce contexte, un plan d'expériences croisé est proposé sous la forme d'une matrice orthogonale présentant le niveau des variables de contrôle (en lignes), en fonction de l'impact des facteurs incontrôlables (en colonnes). Chaque case de cette matrice est une expérience menée avec une fixation des valeurs des variables de contrôle, en lignes, et des valeurs de facteurs incontrôlables en colonnes. La case va contenir la mesure de la fonction à rendre robuste pour cette expérience. Une solution de conception serait donc composée des valeurs d'une ligne de la matrice. Plusieurs plans d'expériences seront ainsi réalisés. La robustesse de chaque solution sera évaluée au travers d'une fonction perte ou d'un ratio signal / bruit (S/N). Ce ratio prend en compte à la fois la dispersion de la performance en raison des facteurs bruit (la robustesse) et le rapprochement de la performance moyenne de sa valeur cible. Dans ses travaux, Genin a utilisé la méthode de Taguchi pour étudier l'existence d'une réponse robuste sur une application industrielle [Genin, 03], [Genin et al., 07]. La méthode de Taguchi est facile à mettre en œuvre et peut être appliquée aussi bien pour des facteurs quantitatifs que des facteurs qualitatifs. De plus, elle ne nécessite pas un temps de calcul important du fait de l'utilisation de certains plans d'expériences. Toutefois, certains auteurs dont Box [Box, 88] ont des critiques quant à l'utilisation du ratio S/N pour un problème d'optimisation (maximisation ou minimisation). De plus, ce ratio est jugé très peu significatif d'un point de vue industriel [Durieux et al., 03].

Pour remédier aux problèmes de minimisation ou de maximisation des facteurs quantitatifs, des méthodes à base de techniques mathématiques et/ou statistiques sont encore utilisées. Dans ce cadre, nous citons la méthode de surface de réponse (RSM) [Montgomery, 97]. La RSM donne la possibilité de formuler analytiquement la mesure de performance sur le domaine de variation des facteurs contrôlables. Une telle formulation mathématique est obtenue grâce à la technique de régression linéaire. Par la suite, la RSM procède à l'optimisation de la mesure de performance en ayant recours à l'algorithme de la plus grande pente [Durieux et al., 03]. Une autre méthode a été proposée par Pierreval et Durieux [Pierreval et al. 02] qui se fonde sur une optimisation via simulation en ayant recours à des courbes de références. L'originalité de cette méthode se manifeste par sa considération de l'environnement attendu par les décideurs qui sera noté EA. Sur la base de EA, il y aura optimisation des facteurs contrôlables pour obtenir ainsi la meilleure solution souhaitée notée DS. Par la suite, pour chaque environnement E, une solution X sera calculée et confrontée avec la solution souhaitée DS. Ainsi, sur l'environnement E, deux entités seront mises en relief : le gain minimal requis par les décideurs pour choisir X au lieu de DS et la perte de performance mesurée si la solution X sera appliquée dans l'environnement attendu EA. Enfin, à l'aide de courbes de références qui fixent les contraintes des décideurs, la comparaison entre les différentes solutions X avec la solution souhaitée DS permet de dégager la meilleure solution RS. Une explication plus détaillée de cette méthode pourra être consultée dans [Durieux et al., 03].

Une autre approche, qui a suscité un important intérêt, est la « programmation robuste » (Robust Programming). Cette approche a été développée par Mulvey et al., et Mulvey et Ruszczyński et a été présentée dans leurs travaux [Mulvey et al., 95a] et [Mulvey et al., 95b]. La programmation robuste est une programmation stochastique améliorée. Elle se fonde sur le principe d'une introduction de l'aversion au risque du gestionnaire ou la fonction modélisant le service client dans le modèle stochastique.

Ensuite, à l'aide d'une série d'optimisations, les auteurs pensent trouver progressivement, des solutions moins sensibles aux variations des données et donc des solutions robustes. Ces chercheurs ont appliqué leur méthode dans des applications réelles afin de montrer son aptitude à faire face à des données erronées, incertaines ou bruitées [Mulvey et al. 95a]. Les applications traitées n'étaient pas dans un contexte de planification (imagerie médicale, routes aériennes et capacités d'usines électriques), toutefois, ces auteurs ont suggéré que la programmation robuste peut opérer dans des problèmes de planification de la production. Cependant, l'handicap majeur de cette méthode se résume par le fait que « *le nombre total de variables et contraintes dépasse fréquemment la capacité des ordinateurs standards et des logiciels d'optimisation* » [Mulvey et al. 95b], [Bai et al. 97]. Une telle difficulté a poussé Mulvey et Ruszczyński à développer une méthode permettant de décomposer le problème d'optimisation initial en des sous-problèmes qui seront affectés à des stations de travail différentes [Mulvey et al. 95b].

Dans la littérature, nous avons cerné encore, le recours à des approches hiérarchisées pour la planification et le pilotage robuste de système de production. Ces approches se fondent sur les principes de décomposition fonctionnelle et temporelle ainsi que l'agrégation/désagrégation du système étudié ; ce qui les rend adaptées pour la gestion des systèmes complexes, notamment, les systèmes de gestion de la production [Hétreux, 96]. Dans ce contexte, Hax et Meal sont considérés parmi les premiers chercheurs qui ont formalisé une structure hiérarchisée pour la planification de la production comportant trois niveaux différents d'agrégation de produit [Hax et al., 75].

Dans le cadre de la planification à moyen terme de la production, avec la prise en compte explicite d'une demande détaillée incertaine, Mercé a développé une planification hiérarchisée à deux niveaux décisionnels [Mercé, 87]. Le premier niveau, ou niveau supérieur, adopte une agrégation logique des produits détaillés en familles de produits. Il génère ainsi, un plan de production agrégé qui doit satisfaire la demande agrégée des clients, respecter les contraintes de production prises en compte à ce niveau et minimiser le coût total de production. Le deuxième niveau, appelé encore niveau inférieur, va effectuer la désagrégation du plan agrégé en répartissant chaque quantité de familles de produits entre les produits détaillés qui la composent ; et ceci dans le but de satisfaire la demande détaillée. La planification agrégée se déroule sur un horizon glissant caractérisé par un sous-horizon gelé sur lequel les décisions agrégées sont fixées et ne peuvent pas être modifiées au cours des planifications ultérieures. Ainsi, à chaque étape de planification, seules les décisions agrégées gelées vont être réellement implémentées ; et de ce fait, ce sont ces décisions agrégées qui seront effectivement désagrégées par le niveau inférieur. D'où, l'horizon de planification établi au niveau inférieur coïncide avec cet horizon gelé. Le niveau inférieur va entamer alors un processus de désagrégation dynamique avec une périodicité unitaire. Ainsi, au début de chaque période de l'horizon détaillé, il y aura une désagrégation des décisions agrégées qui y sont relatives. Une telle désagrégation se fera sur la base de l'état réel constatée au début de la période considérée et des demandes détaillées qui s'y rapportent. Un tel processus se réitère alors, période par période, de telle sorte que le plan agrégé sera successivement désagrégé pour construire un plan détaillé. Dans son approche, Mercé introduit un contexte incertain de la planification qui concerne exclusivement, la répartition de la demande agrégée en demande détaillée par produits. En fait, Mercé suppose que la demande agrégée (en familles de produits) est

connue avec certitude sur l'horizon de planification complet. Cependant, la composition détaillée de la demande agrégée n'est connue avec certitude que pour la première période de désagrégation. En ce qui concerne les autres périodes, les composantes de la demande détaillée peuvent varier dans une plage de valeurs fixée. Dans ce contexte, Mercé établit deux concepts génériques pour caractériser l'interaction entre les deux niveaux agrégé et détaillée : la robustesse et la cohérence [Erschler et al. 85], [Mercé, 87]. Ainsi, une décision agrégée est robuste si elle assure au moins l'existence d'une décision détaillée ; et vice versa, une décision détaillée est cohérente si elle est compatible avec la décision agrégée [Mercé, 87], [Cauvin et al., 02]. Dans ce cadre, la notion de robustesse est traitée au niveau agrégé. Elle traduit, en fait, « *la capacité d'adaptation du plan agrégé à toutes les situations détaillées possibles* » [Mercé, 87]. Pour assurer la robustesse des décisions agrégées, Mercé spécifie des conditions nécessaires et suffisantes de robustesse qu'elle formalise analytiquement et les intègre au modèle de planification agrégée. De même, des conditions analytiques pour garantir la cohérence des décisions détaillées ont été élaborées et incluses au modèle de planification détaillé. Ces conditions de robustesse et de cohérence, ont été le résultat d'une analyse conjointe des modèles mathématiques agrégé et détaillée et des relations d'agrégation-désagrégation qui les lie.

Dans le même contexte des approches hiérarchisées, nous citerons l'approche CODECO (Conduite Décentralisée Coordonnée). Historiquement, cette approche a été développée au laboratoire d'automatique de Grenoble en 1975 par les chercheurs Binder et al., [Binder et al., 75]. Dans un premier temps, CODECO a été proposée pour la commande des systèmes automatisés et appliquée dans des problématiques de pilotage des procédés continus. Par la suite, la mise en œuvre de l'approche a été étendue vers le pilotage d'atelier de production et l'ordonnancement de la production [Al Kazzaz, 89], [Aguilera, 93], [Baillet, 94], [Chetouane, 99]). L'approche CODECO, se fonde sur une organisation hiérarchisée. Elle permet de structurer le système étudié sous la forme de centres de décisions répartis en différents niveaux hiérarchiques. Les centres de décisions appartenant à un même niveau auront chacun une certaine autonomie décisionnelle qui leur permet d'établir des relations de coopération entre eux afin de faire face à d'éventuelles perturbations sans remettre en cause le cadre décisionnel qui leur provient du niveau immédiatement supérieur. Un tel niveau supérieur va renfermer un ou plusieurs centres de décisions qui auront le rôle de coordination entre les centres décisionnels qui sont sous leur tutelle. Ces centres de coordination auront la charge d'une part, d'assurer la résolution des conflits locaux non anticipés entre les centres du niveau inférieur, et d'autre part, d'accroître l'autonomie octroyée à un ou plusieurs centres bien spécifiques si une nécessité l'impose [Cauvin et al., 02]. Ainsi, l'approche CODECO, se base sur une structure décisionnelle qui présente un compromis entre les approches hiérarchisées et celles décentralisées ce qui favorise son application dans le cadre d'environnement incertain et perturbé [Baillet, 94]. Dans ce cadre, la robustesse de l'approche est présentée comme « *la capacité de maintenir les performances fixées par l'organisation face aux perturbations* » [Cauvin et al., 02]. Elle est assurée, au niveau organisationnel, par l'exploitation de la marge d'autonomie accordée par le centre coordinateur à chaque centre coordonné et la caractérisation de l'ensemble des relations que maintient un centre avec ses pairs du même niveau hiérarchique [Cauvin et al. 02] [Chetouane et al, 98].

### 3.3. Approche décisionnelle à deux niveaux pour la planification réactive et robuste

#### 3.3.1. Description et caractéristiques de la structure décisionnelle proposée

Pour assurer la planification optimale et réactive recherchée, nous proposons de coordonner et de synchroniser une planification agrégée à moyen terme et une planification détaillée à court terme dans le cadre d'une structure à deux niveaux [Gharbi et al., 08]. La coordination entre niveaux est effectuée à l'aide de la notion de «Plan de Guidage».

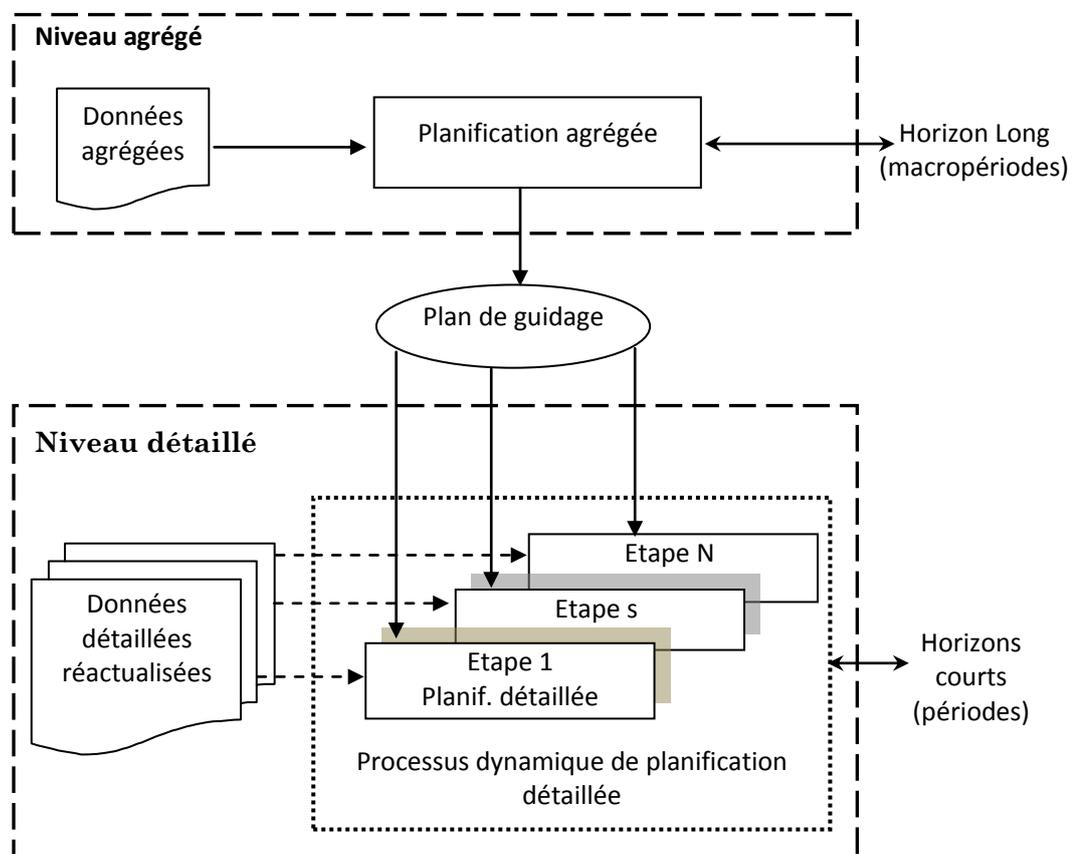


Figure II-2 Structure décisionnelle à deux niveaux

La planification agrégée (à moyen terme) précise les volumes globaux de production interne ou sous-traitée, les ajustements de capacités, les niveaux de stocks sur des macro-périodes pour satisfaire à moindre coût les prévisions de demandes par macro-période connues sur l'horizon considéré. Un plan de guidage peut être défini à l'issue de cette étape : il contient les informations que l'on choisit de transmettre au niveau détaillé et qui seront interprétées par celui-ci comme des contraintes à respecter ou des objectifs à atteindre. Selon la portée temporelle et la nature des informations contenues dans le plan de guidage, on accorde une autonomie plus ou moins grande au niveau détaillé. Une planification détaillée, à plus court terme, est alors effectuée. Elle est basée sur une

modélisation plus fine du processus de production de l'entité et de ses relations avec ses partenaires. Elle doit, dans la mesure du possible :

- s'inscrire dans le cadre du plan de guidage,
- prendre en compte les données détaillées réelles au fur et à mesure de leur disponibilité,
- réagir aux divers aléas et fluctuations des données perturbant la production.

La non-existence d'un tel plan détaillé nécessite la remise en cause du plan à moyen terme.

Cette approche est ainsi mise en œuvre à l'aide d'une structure décisionnelle à deux niveaux basée sur une agrégation temporelle pour le niveau supérieur et un processus de planification dynamique pour le niveau inférieur comme le montre la figure 2. En effet, on peut raisonnablement envisager que des prévisions de demandes (ou de capacités de ressources) soient disponibles à moyen terme sur des macro-périodes avec une fiabilité accrue par le phénomène d'agrégation alors que leur répartition détaillée au sein des macro-périodes n'est connue et donc exploitable qu'à court terme, avec une fiabilité moindre qui exige des re-planifications partielles fréquentes. Dans ce contexte, le plan de guidage est fondamental pour assurer en premier lieu, une certaine stabilité agrégée, en second lieu l'optimalité à moyen terme du processus de planification réactif, et en troisième lieu la robustesse de la structure en fonction de l'autonomie décisionnelle accordée au niveau inférieur.

L'approche que nous proposons réunit les avantages de l'agrégation avec ceux procurés par l'affinement dynamique des décisions agrégées effectué dans le cadre d'une structure décisionnelle à deux niveaux. En ce qui concerne l'agrégation, elle présente un triple intérêt [Fontan et al., 01], [Mercé, 87] :

- Au niveau de la complexité des modèles : en diminuant le nombre de variables traitées, le volume de données manipulées et de contraintes à prendre en compte, l'agrégation permet ainsi de réduire fortement la complexité des modèles de décisions conçus ce qui facilite leur résolution sur des moyens informatiques ordinaires,
- Au niveau des prévisions des données futures : la prévision sur des données agrégées permet d'avoir des estimations plus fiables que celle faite sur la base de données détaillées. En fait, lors de prévision à long terme concernant des données agrégées, la variation de celle-ci se montre plus faible que celle concernant une prévision sur des données détaillées. C'est le phénomène de compensation d'erreur,
- Au niveau de la mise en œuvre détaillée des décisions agrégées : l'agrégation induit une certaine forme d'abstraction au niveau de la prise de décision agrégée. Cette abstraction confère une souplesse lors de la désagrégation de la décision agrégée [Fontan et al., 01]. Par exemple, la détermination du volume d'heures agrégées qui sera réalisé par une ressource donnée sur une période agrégée spécifiée, permet au niveau inférieur de répartir un tel volume global sur les périodes détaillées associées selon l'état réel de l'atelier

et de la ressource considérée. Dans ce contexte, une telle souplesse est en fait une source d'autonomie lors de la désagrégation de la décision agrégée.

Quand aux qualités offertes par une structure décisionnelle à deux niveaux adoptant un affinement dynamique des décisions agrégées, elles se présentent comme suit [Fontan et al., 01], [Huguet, 94] :

- Les décisions agrégées assurent une vision globale du problème de planification ce qui permet d'opter pour un cadre décisionnel agrégé optimal au niveau supérieur,
- Le processus de désagrégation permet d'exploiter l'autonomie accordée par le niveau supérieur au niveau inférieur via le plan de guidage. Une telle autonomie sera utilisée pour assurer une certaine robustesse des décisions agrégées.
- L'existence d'horizons de décision spécifiques à chaque niveau, rend facile la mise en œuvre de processus de désagrégation dynamique garantissant une réactivité face à d'éventuelles perturbations ou fluctuations détectées au niveau inférieur,
- L'élaboration de différents niveaux de prise de décision peut être adéquat avec la réalité de prise de décision en entreprise ( ex : PIC/PDP).
- Afin de pouvoir caractériser la performance de notre approche lors de sa mise en œuvre dans des expérimentations numériques et avoir la possibilité de la comparer avec d'autres approches, un recours à une ou plusieurs mesures de performance s'impose. En fait, le concept de la performance industrielle et plus spécifiquement l'étude de performance dans la planification des chaînes logistiques a été largement abordée dans la littérature [Burlat et al., 01], [Chan, 03], [Marquès et al., 09] [Amrani-Zouggar, 09]. Ainsi, dans le paragraphe suivant, nous abordons certains aspects de la caractérisation de la performance et sa mesure dans les chaînes logistiques pour en retenir ceux que nous allons utiliser dans la suite de notre travail.

### 3.3.2. Eléments de mesure de performance

La mesure de performance dans les chaînes logistiques « *s'intéresse à l'amélioration du fonctionnement des processus support à la production et à l'accroissement de la productivité globale* » [Amrani-Zouggar, 09]. Généralement, Les outils et approches instrumentant la mesure de performance au périmètre d'une entreprise se sont adaptés au contexte d'évaluation de performances dans les chaînes logistiques. L'un de ces outils, est le tableau de bord. En effet, [Bouquin, 04] définit le tableau de bord comme « *un instrument de mesure où un ensemble d'indicateurs permet aux décideurs de prendre connaissance de l'état et de l'évolution des systèmes qu'ils pilotent* ». Cette dernière définition, évoque la notion d'indicateur comme un moyen de mesure de performance. En effet, dans la littérature scientifique, nous cernons plusieurs définitions de la notion d'indicateur de performance :

- a) « *Un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui exprime l'efficacité et / ou l'efficience de tout ou partie d'un système (réel ou simulé), par*

*rapport à une norme, un plan déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise* » [Biteau et al., 91], [Berrah, 97],

- b) « *Un indicateur de performance est une traduction chiffrée des objectifs stratégiques poursuivis par l'organisation* » [Epstein et al., 98],
- c) « *Un indicateur de performance est une information devant aider un acteur individuel ou une organisation à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif, ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat* ». [Bonnefous, 01],
- d) « *Un indicateur de performance est associé à une « action à piloter » dont il doit révéler la pertinence opérationnelle* » [Lorino, 01], [Bouquin, 04].

Les indicateurs peuvent être regroupés en deux grandes catégories, comme le présente Chan [Chan, 03] :

1. Quantitative : c'est une mesure d'une grandeur physique. Dans ce type de mesure nous trouvons des grandeurs tels que :
  - a. Les coûts : coût de distribution, coût de production, coût de stockage, etc.
  - b. Utilisation des ressources : capacité des machines, énergie utilisé, etc.
2. Qualitative : une appréciation sur une échelle de valeur subjective [Stalk et al., 90] tel que :
  - a. La qualité : satisfaction du client, temps de réponse client (entre l'ordre et la livraison), etc.
  - b. Flexibilité : flexibilité des machines, flexibilité de routage, flexibilité de la main d'œuvre

Amrani-Zouggar en se référant aux travaux de [Lorino, 01] annonce qu' « *un indicateur se décline à partir de l'objectif cible et de la connaissance des leviers d'action* ». C'est ainsi que nous pourrions trouver des indicateurs aussi différents que les différents objectifs établis par les décideurs et les différents leviers d'action. Etant donné que les objectifs d'une organisation varient selon leur nature et leur horizon temporel alors il en est de même pour les indicateurs de performances. C'est ainsi que [Bonnefous, 01] distingue entre les indicateurs stratégiques, tactiques et opérationnels. Dans sa thèse, Amrani-Zouggar [Amrani-Zouggar, 09] présente une typologie des indicateurs selon la vision de Bonnefous. Parmi les indicateurs qui affectent le moyen terme, Amrani-Zouggar a cité le respect du plan de production et le coût de production, cependant, le taux de satisfaction client a été considéré comme un indicateur stratégique.

En ce qui concerne la suite de notre travail, il nous paraît intéressant de caractériser la performance de notre approche face aux perturbations et fluctuations de l'environnement selon le coût total de production et le taux de satisfaction client. En effet, dans une conjoncture économique fortement concurrentielle, la réactivité de notre structure décisionnelle est considérée comme un moyen qui permet de garder une bonne satisfaction des clients tout en maintenant un coût de production maîtrisé et compétitif. D'où le choix de ces deux indicateurs. Quant à la notion de robustesse, nous développerons des indicateurs bien spécifiques pour la caractériser selon la vision que nous allons adopter

pour ce concept. Ces indicateurs de robustesse seront développés dans le quatrième chapitre.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons positionné notre travail de thèse dans le contexte de la planification tactique de chaîne logistique, en nous intéressant essentiellement aux processus d'approvisionnement et de production. Dans ce contexte, nous avons élaboré une revue des approches de planification appliquées dans le cadre de gestion de chaîne logistique. Ceci, nous a amené à retenir les approches hiérarchiques comme une solution pertinente. D'une part, ces approches reflètent la réalité des relations de pouvoir qui s'installent entre des entités d'une même chaîne. D'autre part, elles offrent un bon compromis entre la recherche d'une planification optimale, synonyme de compétitivité, et la souplesse décisionnelle, source de réactivité.

En effet, dans une conjoncture économique caractérisée par une concurrence accrue et un environnement technologique et social fluctuant, la réactivité est devenue un enjeu majeur pour les chaînes logistiques. Dans ce cadre, nous nous sommes proposés, tout d'abord, d'étudier les concepts de risque, d'incertitude et de perturbation qui sont devenues émergents dans les travaux se rapportant à la planification de chaîne logistique. Dans un premier temps, nous avons caractérisé ces concepts en présentant certaines définitions et certaines typologies existantes dans la littérature. Sur ce dernier point, nous avons pu distinguer que l'incertitude qui touche la demande client était la plus considérée dans les travaux de recherche. Ainsi, dans un second temps, nous avons proposé un état de l'art concernant les approches de modélisation explicite de l'incertitude sur la demande, et ceci, pour des problématiques de planification de chaîne logistique. Notre but, étant de pouvoir proposer une approche permettant une planification réactive de la chaîne logistique face à l'incertitude qui peut toucher les paramètres de l'environnement de production. Toutefois, la notion de prise de décision sous incertitude fait surgir une autre problématique aussi importante que celle que pose la réactivité. Dans ce cas, nous parlons alors, de la robustesse des décisions. Afin de bien éclaircir ces deux concepts, nous avons présenté, en premier lieu, une revue approfondie de différentes définitions émanant de la littérature. En second lieu, des pratiques industrielles classiques pour favoriser la réactivité des systèmes de production ainsi que des approches utilisées pour assurer la robustesse de la planification de la production, ont été détaillées. Sur la base de ce travail, nous avons pu consolider notre orientation vers une approche de planification hiérarchisée. Dans ce cadre, nous avons proposé une structure décisionnelle à deux niveaux dans l'objectif d'assurer une planification réactive et robuste à la fois. Enfin, nous avons exposé quelques éléments de la mesure de performance dans les chaînes logistiques, afin de pouvoir affiner notre choix d'indicateurs de performance nécessaires pour évaluer notre approche et la positionner par rapport à d'autres.

Nous rappelons qu'au début de ce chapitre, nous avons opté, dans le cadre des approches hiérarchisées, pour une vision hétérarchique de la modélisation décisionnelle de la chaîne logistique. Elle se fonde sur la représentation de relations directes entre centres de décision. C'est dans cette perspective que nous allons proposer, dans le chapitre suivant, un maillon générique d'une chaîne logistique mettant en œuvre des relations de

type client-fournisseur entre les entités qui la composent. Sur la base de ce maillon, nous développerons une modélisation mathématique de notre structure décisionnelle. Toutefois, nous adoptons une démarche progressive pour l'exploitation et la modélisation de notre approche. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous nous intéressons au niveau inférieur afin de bien approfondir les concepts de la planification dynamique de manière à la formaliser analytiquement. La mise en œuvre des deux niveaux est développée, au cours du quatrième chapitre.

## ***Chapitre III***

# **Planification dynamique réactive : Concepts et Modèles**

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte détaillé dans lequel nous avons étudié finement les caractéristiques du processus de prise de décision en planification. Nous définissons également les hypothèses de base pour la réalisation d'une planification dynamique performante et dotée de capacité de réactivité pour faire face à un environnement caractérisé par des paramètres incertains.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Nous commençons par présenter la structure de chaîne logistique qui constitue le cadre global de notre étude. Dans cette chaîne, nous nous focalisons sur une entité centrale pour laquelle nous développons les hypothèses de fonctionnement et les caractéristiques de planification. Par la suite, nous étudions les différentes spécificités du processus de prise de décision dans les entreprises manufacturières afin de dégager les phases décisionnelles et les délais qui leur sont associés. Nous introduisons alors le principe général du processus de planification dynamique à horizon glissant et nous proposons un modèle mathématique qui traduit notre approche de planification dynamique. Enfin, nous présentons l'outil de simulation qui a été développé autour de notre modèle mathématique. Cet outil est utilisé pour évaluer la performance de la planification dynamique dans le cadre spécifique d'une demande incertaine.

## **1 Contexte de l'étude et analyse décisionnelle**

Nous avons choisi de conduire notre étude sur une structure élémentaire représentative d'un maillon générique d'une chaîne logistique de taille quelconque. Pour cette structure, nous développons les hypothèses de base à partir desquelles nous avons construit la modélisation analytique également présentée par la suite.

### **1.1 Proposition d'une structure élémentaire d'une chaîne logistique**

La figure III-1 illustre la structure de la chaîne logistique considérée. Cette chaîne est limitée à cinq acteurs :

- un producteur principal de produits finis,
- un ensemble de clients,

- un sous-traitant (i.e. qui rend des produits finis),
- un fournisseur de produit fini,
- un fournisseur de composants.

Ces acteurs échangent entre eux des flux d'information et des flux physiques. Les relations qui les lient sont de type point-à-point.

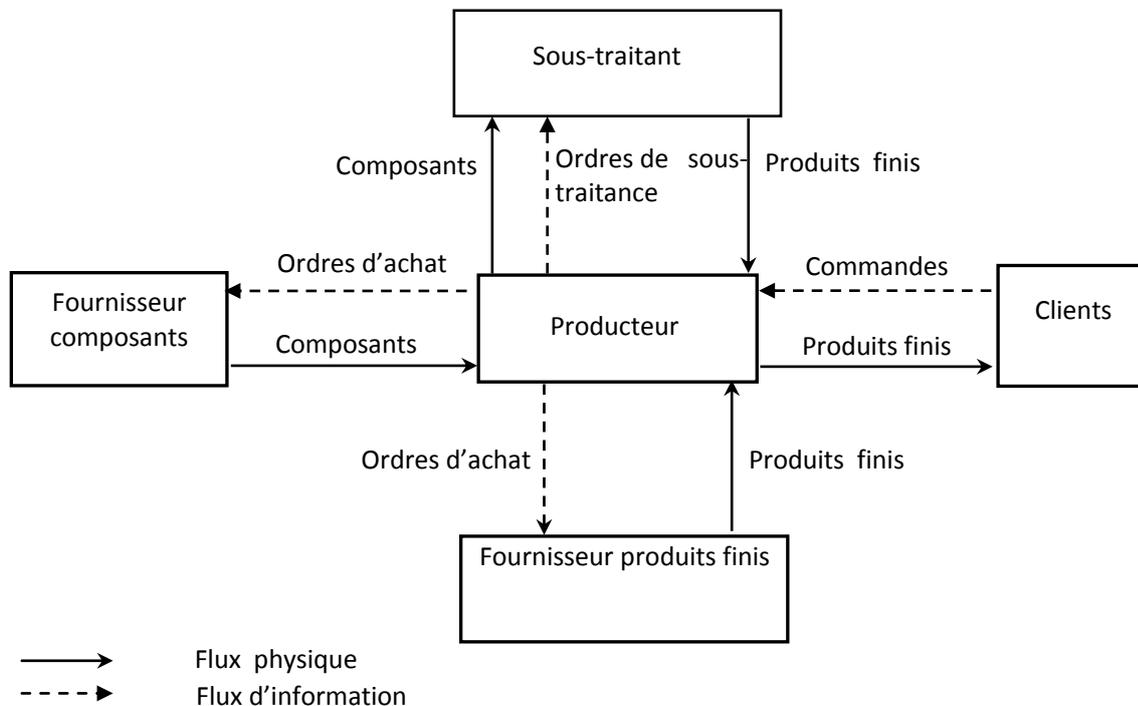


Figure III-1 Structure de la chaîne logistique étudiée

Nous nous plaçons dans le cas d'un producteur qui assure la production d'une variété de produits finis en utilisant différents composants. Pour ce faire, il gère un stock pour chaque produit fini ainsi qu'un stock pour chaque composant. Les capacités de stockage sont considérées infinies. La notion d'arriéré de production est prise en compte. Les arriérés sont assimilés à des stocks algébriques permettant de modéliser les retards dans la satisfaction des demandes.

Pour ajuster la capacité de production, le producteur a la possibilité de recourir à la sous-traitance et/ou à l'achat de produits finis et/ou à l'utilisation des heures supplémentaires. Dans le cas de la sous-traitance, le producteur fournit à son sous-traitant les composants nécessaires pour la fabrication des unités désirées. En cas d'achat direct auprès d'un fournisseur de produits finis, ce dernier se charge de l'acquisition des composants nécessaires. En ce qui concerne les heures supplémentaires, elles ne peuvent pas dépasser un seuil maximum défini pour chaque ressource et pour chaque période.

Pour cette chaîne de complexité réduite, nous envisageons d'étudier le processus de planification qui permet au producteur de satisfaire au mieux les demandes clients tout en minimisant le coût global. Ce processus doit prendre en compte les hypothèses selon lesquelles le producteur interagit avec ses fournisseurs et son sous-traitant ainsi que les

leviers de flexibilité dont il dispose et qui constituent des degrés de liberté exploitables en cas de nécessité (notamment en cas de perturbations et/ou incertitudes).

Nous étudions principalement l'entité « producteur » et nous nous intéressons essentiellement à l'élaboration de sa planification qui doit permettre d'atteindre les deux objectifs suivants :

- 1) générer un plan de production optimal par rapport aux différents coûts relatifs au processus de production et aboutissant à la satisfaction des demandes clients connues à moyen terme;
- 2) assurer la réactivité du processus de planification pour absorber les perturbations éventuelles ainsi que les incertitudes sur certaines données (demandes clients, capacités disponibles, etc.).

Le plan de production définit :

- des décisions de production en interne, par produit,
- des décisions d'utilisation éventuelles d'heures supplémentaires par ressource,
- des décisions de sous-traitance, par produit,
- des décisions d'achat de produits finis, par produit,
- des décisions d'approvisionnement en composants.

Le paragraphe qui suit caractérise avec une vision fine le processus décisionnel.

## 1.2 Analyse fine du processus décisionnel

### 1.2.1 Caractéristiques générales de prise de décision dans l'environnement industriel

Dans la réalité industrielle, la concrétisation d'une décision est une action non instantanée qui s'effectue en passant par différentes phases. Ce caractère multi-phase est imposé par des contraintes que nous pouvons répartir en deux classes : les contraintes techniques et les contraintes socio-économiques.

**Les contraintes techniques** regroupent toutes celles qui sont issues des caractéristiques techniques des moyens de production. Ces contraintes imposent des délais temporels selon lesquels l'exécution d'une décision donnée peut être programmée. Par exemple, le temps nécessaire pour la production d'un produit fini  $i$  est un temps imposé par la préparation de ses composants et par les vitesses de traitement des différentes ressources de production par lesquelles transite le produit  $i$ .

**Les contraintes socio-économiques** se rapportent à des aspects d'éthique de travail ainsi qu'à des aspects d'ordre social, économique et/ou administratif qui doivent être prises en compte dans la réalisation d'une décision.

A titre d'exemple, décider d'augmenter la capacité de production par le changement du nombre d'équipes et/ou le recours aux heures supplémentaires engage le décideur à prendre en compte les délais de préparation que ce soit vis-à-vis du personnel permanent ou vis-à-vis du recrutement de personnel intérimaire, la législation du travail en vigueur, les seuils acceptables en surcoûts, etc.

### 1.2.2 Phases du processus décisionnel

Compte tenu de la pratique industrielle et des contraintes techniques et socio-économiques évoquées au paragraphe précédent, la caractérisation de chacune des décisions du plan de production passe par deux phases :

- 1) la phase d'anticipation de la réalisation de la décision,
- 2) la phase de la réalisation effective de la décision.

#### 1.2.2.1 La phase d'anticipation de la réalisation d'une décision

C'est la phase qui engage les préparatifs nécessaires à la réalisation effective de la décision. Elle est caractérisée par une date de début et une durée ou délai d'anticipation (i.e. délai nécessaire préalablement au déclenchement de la réalisation effective). Dans la suite, si 'e' désigne une décision donnée du plan de production, nous notons par  $lb_e$  le délai d'anticipation associé.

#### 1.2.2.2 La phase de la réalisation effective de la décision

C'est la phase qui commence par le déclenchement effectif de la réalisation de la décision et qui se poursuit jusqu'à son achèvement. Elle est également caractérisée par une date de début de réalisation et d'un délai d'achèvement ou de réalisation. Nous notons par  $lm_e$  ce délai.

### 1.2.3 Formalisation du processus décisionnel

Compte tenu de la prise en compte des deux phases dans le processus décisionnel, la modélisation de la concrétisation de toute décision va pouvoir être caractérisée par trois dates et trois variables :

- $\tau$  et  $be_\tau$ , respectivement date de début de la phase d'anticipation et volume d'engagement considéré,
- $\tau + lb_e$  et  $me_{\tau+lb_e}$ , respectivement date de début de la phase de réalisation effective et volume prévu,
- $\tau + lb_e + lm_e$  et  $qe_{\tau+lb_e+lm_e}$ , respectivement date à laquelle on considère la réalisation de la décision terminée et volume obtenu,

Relativement à la planification prévisionnelle (réalisation sans perturbation), les variables  $be_\tau$ ,  $me_{\tau+lb_e}$  et  $qe_{\tau+lb_e+lm_e}$  sont censées désigner un même volume.

L'exemple suivant illustre ce type de modélisation pour une décision  $x_i$  de production d'un produit  $i$ .

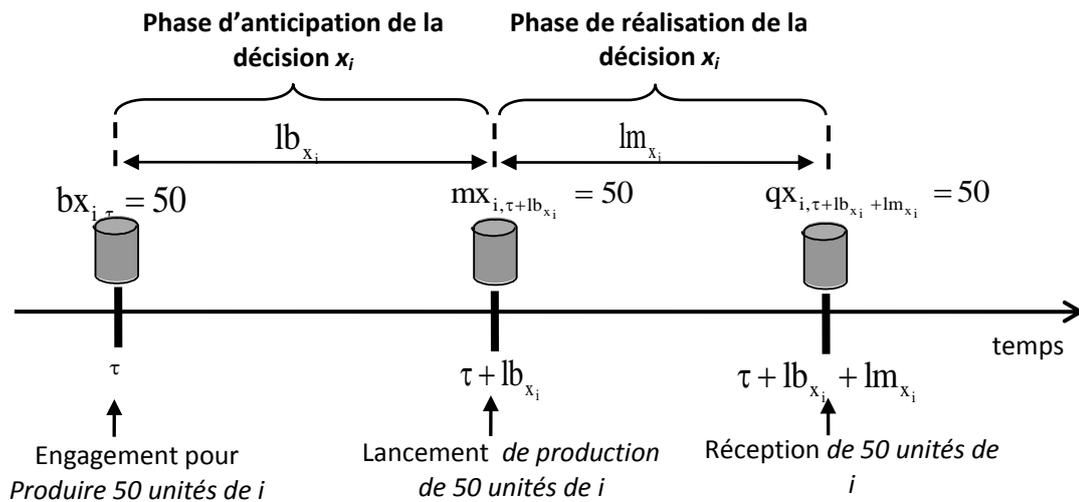


Figure III-2 Formalisation des phases du processus décisionnel

Tenant compte de ce qui précède, la formalisation mathématique du plan de production relatif à cet exemple impose que l'on établisse les deux relations suivantes :

$$mx_{i,\tau+lb_{x_i}} = bx_{i,\tau} \quad (i)$$

$$qx_{i,\tau+lb_{x_i}+lm_{x_i}} = mx_{i,\tau+lb_{x_i}} \quad (ii)$$

En cas de perturbation, les trois variables décisionnelles n'auront pas des valeurs égales.

Une telle modélisation nous permet de :

- nous rapprocher le plus possible de la réalité du processus décisionnel au niveau des entreprises manufacturières,
- expliciter la **dynamique** des phases décisionnelles (anticipation et réalisation) en précisant **dates, délais** et **volumes**,
- assurer une formalisation générique du processus décisionnel applicable à toutes les décisions quel qu'en soit le type (approvisionnement, production en interne, allocation d'heures supplémentaires, sous-traitance, achat de produits finis).

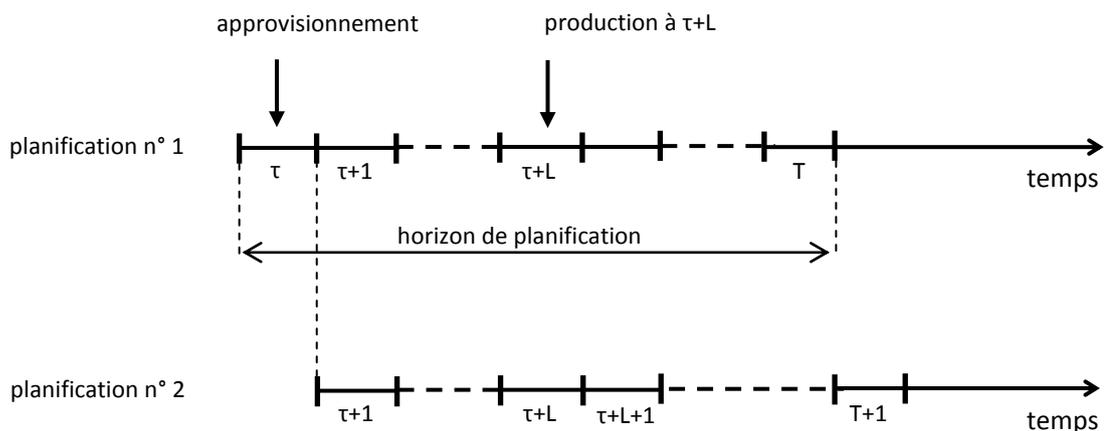
## 2 Processus dynamique de planification

Rappelons que notre approche de planification vise à aménager une marge de réactivité pour faire face à l'incertitude de la demande et aux perturbations pouvant affecter le système de production. Dans la pratique, cela revient à adopter un processus dynamique de planification qui suit de près l'évolution de l'exécution des décisions prises et ajuste ses paramètres au fur et à mesure, afin de maintenir l'exécution dans la trajectoire souhaitée. Dans le paragraphe suivant, nous discutons des fondements d'un tel processus.

## 2.1 Planification à horizon glissant

Dans la planification classique, on considère un *horizon prévisionnel* fini de  $N$  périodes et on effectue, sur la base des données de cet horizon, une planification pour les  $T$  premières périodes,  $T \leq N$ . On obtient un *plan de production* couvrant l'*horizon de planification* constitué par les  $T$  périodes. Généralement, les données relatives aux toutes premières périodes de l'horizon prévisionnel sont connues avec précision ou évaluées de façon proche de la réalité ; tandis que les données des périodes suivantes ne sont qu'estimées. Cependant, les décisions qui sont arrêtées pour chaque période du plan de production sont censées être définitives et implémentées telles quelles.

La planification à horizon glissant et une version améliorée qui consiste à effectuer périodiquement une nouvelle planification, avec une *périodicité de planification*  $PP$  bien inférieure à  $T$  (figure III-3). De la sorte, chaque replanification permet d'intégrer la réactualisation éventuelle des données déjà prises en compte ainsi que des nouvelles données devenues disponibles. Un autre avantage est que les replanifications successives vont pouvoir suivre de près l'évolution de l'état réel du système de production et en tenir compte, ce qui est particulièrement intéressant dans un environnement perturbé. Ce processus dynamique de planification devient, ainsi, en mesure de réagir aux perturbations passées [Mercé, 87].



**Figure III-3 Planification à horizon glissant avec périodicité de planification égale à une période**

Toutefois, la planification à horizon glissant doit être adaptée à la nature dynamique du système de production lui-même et tenir compte de ses contraintes. Déjà, le choix de la périodicité de planification doit résulter d'un compromis entre le besoin de réactualisation des données (informations prévisionnelles et données de l'état du système de production) et l'instabilité de la commande induite par des planifications trop fréquentes [Fontan et al., 01]. Il faut aussi respecter les liens entre les décisions relatives aux différentes périodes. Dans la figure III-3, nous avons considéré le cas d'une périodicité de planification égale à une période et distingué, à dessein, un délai d'approvisionnement de  $L$  périodes. De ce fait, la décision de production à la période  $\tau+L$  se trouve déterminée par la décision d'approvisionnement engagée à la période  $\tau$ , qui, elle n'est pas modifiée par la replanification n° 2. Cette dernière doit donc garder inchangée la décision déjà planifiée

pour la période  $\tau+L$  sauf pour tenir compte d'une perturbation éventuelle. On dit que la planification n°1 gèle la décision relative à la période  $\tau+L$ .

Pour faire simple en pratique, on gèle tout l'intervalle de  $L+1$  périodes ( $\tau$  à  $\tau+L$  sur la planification n°1). La figure III-4 illustre cette procédure. Elle reprend le même exemple de la figure III-3 avec un horizon de planification de 6 périodes, une périodicité de planification PP de 2 périodes et un horizon gelé HG de 3 périodes (supposé correspondre un délai  $L$  égal à 2 périodes) [Zhao et al. 97], [Rota, 98] et [Genin, 03].

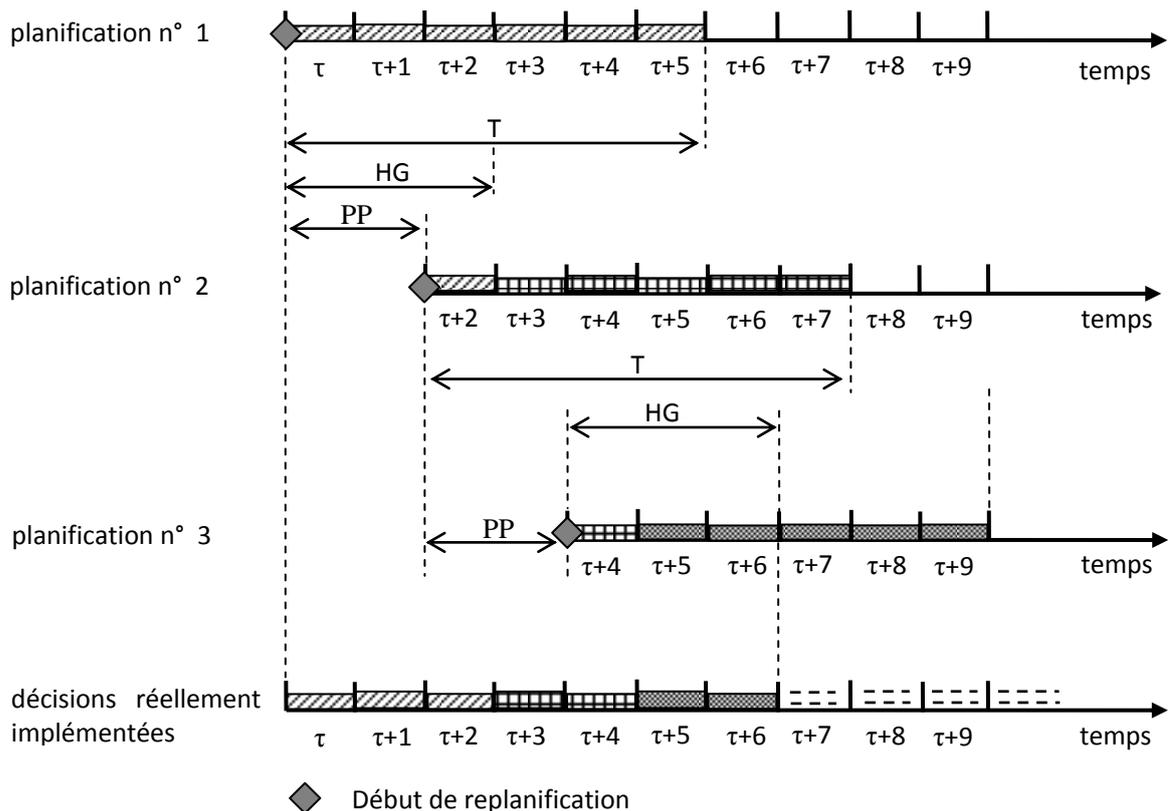


Figure III-4 Planification à horizon gelé [Mercé, 87]

Selon le contexte, on peut décider que l'horizon gelé est supérieur à  $L+1$  périodes. Dans le cas général d'un système produisant  $n$  produits différents soumis, chacun, à un délai  $L_i$ , il est évident que la longueur de l'horizon gelé doit être supérieure ou égale à  $L_{\max} = \max(L_i)$ .

La procédure de planification que nous avons choisi d'approfondir dans nos travaux de thèse s'insère dans ce cadre avec, cependant, les trois particularités suivantes :

- i. Le délai  $L$  correspond à la longueur de la phase d'anticipation, sachant que le principe de considérer une phase d'anticipation et une phase de réalisation est appliqué à n'importe quel type de décision globale.
- ii. Une décision prise à l'instant  $\tau$  et relative à un produit  $i$  ne gèle que la décision de la période  $\tau+L_i$  et sera implémentée telle qu'elle sauf perturbation.

- iii. On adopte l'hypothèse d'un horizon glissant rétrécissant. A chaque replanification, l'horizon de planification considéré est celui de la planification précédente moins la périodicité de planification. Cela est explicité en détail dans la figure III-5.

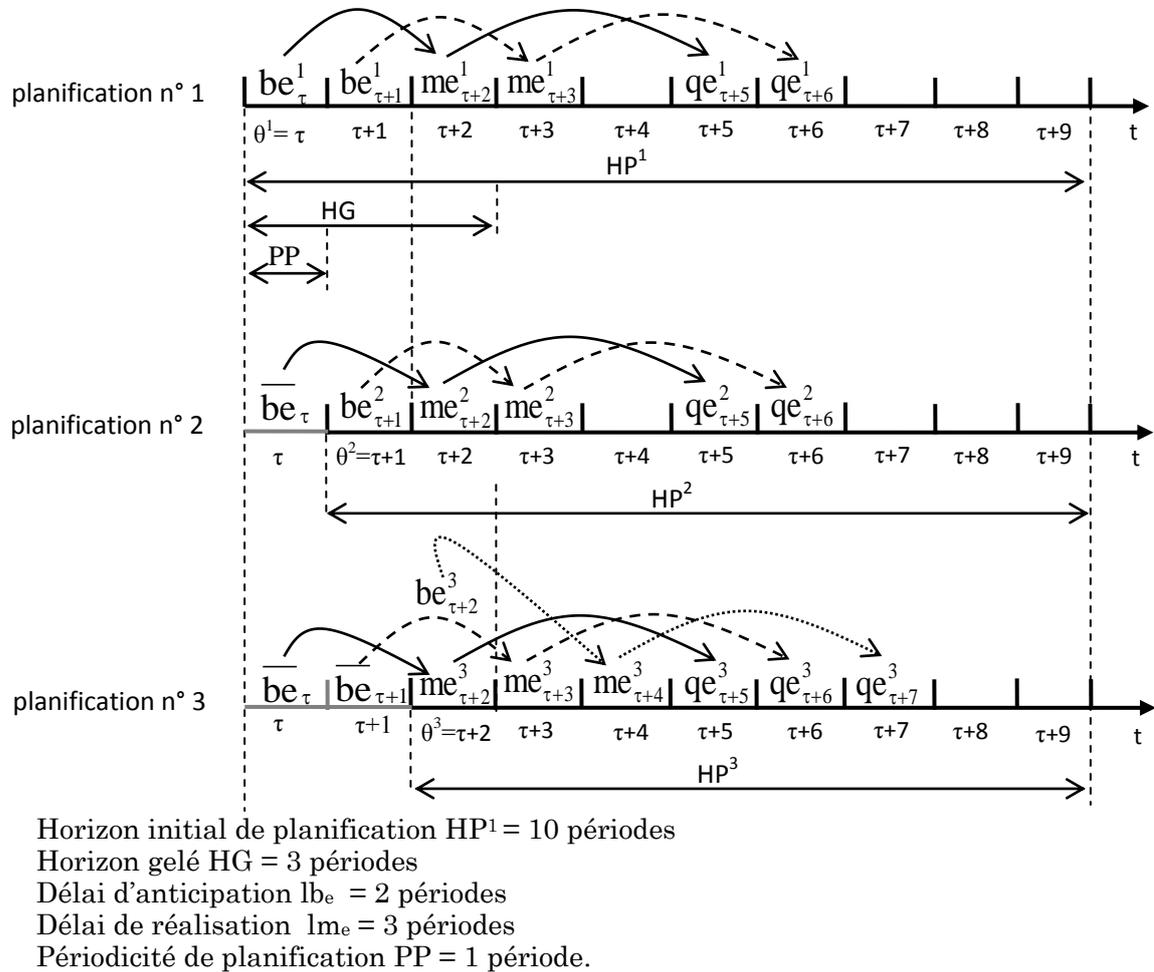


Figure III-5 Planification à horizon glissant rétrécissant

Nous considérons la planification d'une décision globale  $e$  sur un horizon de planification de 10 périodes commençant à la période  $\tau$ . Le délai d'anticipation est supposé égal à 2 périodes, le délai de réalisation est supposé égal à 3 périodes et la périodicité de planification est supposée égale à 1 période.

- La planification n° 1 est effectuée sur l'horizon  $HP^1$  (10 périodes). La phase d'anticipation est engagée avec la valeur de décision  $be_{\tau}^1$ . Cette valeur gèle la décision de début de réalisation à la période  $\tau+2$  avec la valeur  $me_{\tau+2}^1$ . Le résultat est attendu au début de la période  $\tau+5$  avec la valeur  $qe_{\tau+5}^1$ .  
 Sauf perturbation, on a la relation :  $be_{\tau}^1 = me_{\tau+2}^1 = qe_{\tau+5}^1$

- La planification n° 2 est effectuée sur l'horizon HP<sup>2</sup> (9 périodes). La valeur d'anticipation à la période  $\tau+1$  est actualisée à  $be_{\tau+1}^2$ . Cette valeur gèle la décision de début de la réalisation à la période  $\tau+3$  avec la valeur  $me_{\tau+3}^2$ . Le résultat correspondant est attendu au début de la période  $\tau+6$  avec la valeur  $qe_{\tau+6}^2$
- A la fin de la période  $\tau$ , on connaît la valeur précise  $\overline{be}_{\tau}$  avec laquelle la décision d'anticipation engagée à la période  $\tau$  a été accomplie. C'est cette valeur qui détermine le lancement de la réalisation à la période  $\tau+2$  avec la valeur  $me_{\tau+2}^2$  et un résultat attendu à la période  $\tau+5$  avec la valeur  $qe_{\tau+5}^2$ . On a la relation :  $be_{\tau}^1 \geq \overline{be}_{\tau} = me_{\tau+2}^2 = qe_{\tau+5}^2$ .
- La planification n° 3 est effectuée sur l'horizon HP<sup>3</sup> (8 périodes). La valeur d'anticipation à la période  $\tau+2$  est actualisée à  $be_{\tau+2}^3$  ; elle fige la décision du lancement de la réalisation à la période  $\tau+4$  avec la valeur  $me_{\tau+4}^3 \dots$ . La valeur  $\overline{be}_{\tau+1}$  d'accomplissement de la décision d'anticipation  $be_{\tau+1}^2$  détermine la valeur finale  $me_{\tau+3}^3$  du lancement de la réalisation à la période  $\tau+3$ , etc. On a la relation :  $be_{\tau+1}^2 \geq \overline{be}_{\tau+1} = me_{\tau+3}^3 = qe_{\tau+6}^3$ .
- La valeur de début de réalisation à la période  $\tau+2$ ,  $me_{\tau+2}^3$  est actualisée par une lecture de la valeur finale réelle d'anticipation  $\overline{be}_{\tau}$ .

Dans le paragraphe suivant, nous donnons une modélisation mathématique du processus dynamique de planification qui prend en compte l'approche et les notations que nous avons adoptées.

## 2.2 Modélisation mathématique du processus dynamique de planification

A chaque étape de planification  $s$ , nous associons un modèle mathématique  $M^s$ , qui est un programme linéaire qui va décrire le déroulement de la planification à cette étape. Dans ce qui suit, nous détaillons les notations et les équations de notre modèle qui permettent de répondre aux différentes caractéristiques de notre approche de planification détaillée.

### 2.2.1 Données statiques (indépendantes de l'étape $s$ )

#### 2.2.1.1 Indices et dimensions

N : nombre de types différents de produits fabriqués,

R	:	nombre de ressources existantes,
J	:	nombre de composants différents intervenant dans la fabrication des divers produits,
TD	:	nombre de périodes de l'horizon de planification détaillé considéré.
[1,θf]	:	horizon de planification initial HP <sup>1</sup> , avec θf = TD.
PR	:	périodicité de planification,
τ	:	indice d'une période élémentaire (τ : 1,..., θf),
i	:	indice d'un produit fabriqué (i : 1,..., N),
r	:	indice d'une ressource (r : 1,..., R),
j	:	indice d'un composant (j : 1,..., J).

### 2.2.1.2 Coefficients techniques

$\alpha_{ji}$	:	coefficient de composition indiquant le nombre de composants du type j entrant dans la fabrication du produit i,
$\omega_{ir}$	:	coefficient de consommation indiquant le nombre d'unités de ressource de type r consommées pour la fabrication d'un produit i.

### 2.2.1.3 Les délais d'anticipation exprimés en périodes

$lb_{x_i}$	:	délai d'anticipation de production en interne du produit i,
$lb_{y_i}$	:	délai d'anticipation de sous-traitance du produit i,
$lb_{f_i}$	:	délai d'anticipation d'achat direct du produit fini de type i,
$lb_{a_j}$	:	délai d'anticipation d'approvisionnement en composants de type j,
$lb_{h_r}$	:	délai d'anticipation d'allocation d'heures supplémentaires sur la ressource r.

### 2.2.1.4 Les délais de réalisation exprimés en périodes

$lm_{x_i}$	:	délai de réalisation de la production en interne du produit i,
$lm_{y_i}$	:	délai de réalisation de la sous-traitance du produit i,
$lm_{f_i}$	:	délai de réalisation de l'achat direct du produit fini du type i,
$lm_{a_j}$	:	délai de réalisation de l'approvisionnement en composants du type j,
$lm_{h_r}$	:	délai de réalisation de l'allocation d'heures supplémentaires sur la ressource r.

### 2.2.2 Données dynamiques (mises à jour à chaque étape s)

- $\theta^s$  : Période de début de (re)planification effectuée à l'étape s,  $\theta^s = (s-1) \times PR + 1$ , PR étant la périodicité de révision,
- $sip_i^s$  : stock initial en produits de type i au début de l'étape s,
- $sic_j^s$  : stock initial en composants du type j au début de l'étape s,
- $air_i^s$  : arriéré initial en produits du type i au début de l'étape s,
- $d_{i,\tau}^s$  : demande détaillée en produits du type i à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $cap_{r,\tau}^s$  : capacité de la ressource r, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $hm_{r,\tau}^s$  : volume maximum d'heures supplémentaires autorisées sur la ressource r, à la période  $\tau$  de l'étape s.

#### - Coûts unitaires

- $csp_{i,\tau}^s$  : coût unitaire de stockage du produit du type i, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $csc_{j,\tau}^s$  : coût unitaire de stockage du composant du type j, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $car_{i,\tau}^s$  : coût unitaire des arriérés de production en produits du type i, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $cx_{i,\tau}^s$  : coût unitaire de production en interne du produit du type i, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $cst_{i,\tau}^s$  : coût unitaire de sous-traitance du produit du type i, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $csf_{i,\tau}^s$  : coût unitaire d'achat direct du produit du type i, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $ch_{r,\tau}^s$  : coût unitaire des heures supplémentaires allouées sur la ressource r, à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $ca_{j,\tau}^s$  : coût unitaire d'achat du composant du type j, à la période  $\tau$  de l'étape s.

### 2.2.3 Variables décisionnelles définies à chaque étape s :

#### - Production en interne

- $bx_{i,\tau}^s$  : valeur de décision d'engagement de production en produits de type i, générée à la période  $\tau$  de l'étape s,
- $mx_{i,\tau}^s$  : valeur de décision de début de réalisation de production en produits de type i, générée à la période  $\tau$  de l'étape s,

- $qx_{i,\tau}^s$  : quantité réalisée en produits de type  $i$ , obtenue à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .
- Sous-traitance
- $by_{i,\tau}^s$  : valeur de décision d'engagement de sous-traitance en produits de type  $i$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $my_{i,\tau}^s$  : valeur de décision de début de réalisation de sous-traitance en produits de type  $i$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $qy_{i,\tau}^s$  : quantité en produits de type  $i$ , rendue par la sous-traitance à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .
- Achat de produits finis
- $bf_{i,\tau}^s$  : valeur de décision d'engagement d'achat en produits de type  $i$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $mf_{i,\tau}^s$  : valeur de décision de début de réalisation d'achat en produits de type  $i$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $qf_{i,\tau}^s$  : quantité d'achat en produits de type  $i$ , obtenue à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .
- Achat de composants
- $ba_{j,\tau}^s$  : valeur de décision d'engagement d'approvisionnement en composants de type  $j$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $ma_{j,\tau}^s$  : valeur de décision de début de réalisation d'approvisionnement en composants de type  $j$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $qa_{j,\tau}^s$  : quantité d'approvisionnement en composants de type  $j$ , reçue à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .
- Heures supplémentaires
- $bh_{r,\tau}^s$  : valeur de décision d'engagement d'heures supplémentaires sur la ressource  $r$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $mh_{r,\tau}^s$  : valeur de décision de début de réalisation d'heures supplémentaires sur la ressource  $r$ , générée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $qh_{r,\tau}^s$  : quantité d'heures supplémentaires sur la ressource  $r$ , comptabilisée à la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .
- Stocks et arriérés de production
- $sp_{i,\tau}^s$  : stock en produit du type  $i$  à la fin de la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,
- $sc_{j,\tau}^s$  : stock en composant du type  $j$  à la fin de la période  $\tau$  de l'étape  $s$ ,

$ar_{i,\tau}^s$  : arriéré en produit du type  $i$  à la fin de la période  $\tau$  de l'étape  $s$ .

#### 2.2.4 Etat réel des décisions déjà prises au début de chaque étape $s$ :

- Etat réels des décisions d'engagement

$\overline{bx}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la décision d'engagement de production en produit de type  $i$ , engagée à la période  $\tau$ ,

$\overline{by}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la décision d'engagement de sous-traitance en produit de type  $i$ , engagée à la période  $\tau$ ,

$\overline{bf}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la décision d'engagement d'achat de produit de type  $i$ , engagée à la période  $\tau$ ,

$\overline{ba}_{j,\tau}$  : valeur réelle de la décision d'engagement d'achat en composant de type  $j$ , engagée à la période  $\tau$ ,

$\overline{bh}_{r,\tau}$  : valeur réelle de la décision d'engagement d'allocation d'heures supplémentaires sur la ressource  $r$ , engagée à la période  $\tau$ .

- Etat réel des décisions de mise en œuvre

$\overline{mx}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la quantité en produit du type  $i$ , au début de la phase de réalisation de production commençant à la période  $\tau$ ,

$\overline{my}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la quantité en produit du type  $i$ , au début de la phase de réalisation de sous-traitance commençant à la période  $\tau$ ,

$\overline{mf}_{i,\tau}$  : valeur réelle de la quantité en produit du type  $i$ , au début de la phase de réalisation d'achat commençant à la période  $\tau$ ,

$\overline{ma}_{j,\tau}$  : valeur réelle de la quantité en composant du type  $j$ , au début de la phase de réalisation d'achat commençant à la période  $\tau$ ,

$\overline{mh}_{r,\tau}$  : valeur réelle de la quantité d'heures supplémentaires, allouée au début de la phase de réalisation commençant à la période  $\tau$ .

- Etat réel des stocks et des arriérés

$\overline{sip}_i^s$  : valeur réelle du stock en produits de type  $i$ , au début de l'étape de planification  $s$ ,

$\overline{sic}_j^s$  : valeur réelle du stock en composants de type  $j$ , au début de l'étape de planification  $s$ ,

$\overline{air}_i^s$  : valeur réelle de l'arriéré en produits de type  $i$ , au début de l'étape de planification  $s$ .

### 2.2.5 Contraintes

a) En prévisionnel

- Evolution des stocks et limitations dues aux capacités (1)

$$sp_{i,\tau}^s - ar_{i,\tau}^s = \overline{sp}_i^s - \overline{ar}_i^s + qx_{i,\tau}^s + qy_{i,\tau}^s + qf_{i,\tau}^s - d_{i,\tau}^s \quad \forall i=1..N, \tau = \theta^s \quad (1.1)$$

$$sp_{i,\tau}^s - ar_{i,\tau}^s = sp_{i,\tau-1}^s - ar_{i,\tau-1}^s + qx_{i,\tau}^s + qy_{i,\tau}^s + qf_{i,\tau}^s - d_{i,\tau}^s \quad \forall i=1..N, \forall \tau \in HP^s, \tau \neq \theta^s \quad (1.1bis)$$

$$sc_{j,\tau}^s = \overline{sic}_j^s - \sum_{i=1}^N \alpha_{j,i} (mx_{i,\tau}^s + my_{i,\tau}^s) + qa_{j,\tau}^s \quad \forall j=1..J, \tau = \theta^s \quad (1.2)$$

$$sc_{j,\tau}^s = sc_{j,\tau-1}^s - \sum_{i=1}^N \alpha_{j,i} (mx_{i,\tau}^s + my_{i,\tau}^s) + qa_{j,\tau}^s \quad \forall j=1..J, \forall \tau \in HP^s, \tau \neq \theta^s \quad (1.2bis)$$

Les contraintes (1.1) et (1.1bis), d'une part, et (1.2) et (1.2bis), d'autre part, formalisent l'évolution des stocks respectivement de produits finis et de composants, sur l'horizon de planification.

$$\sum_{i=1}^N \omega_{i,r} mx_{i,\tau}^s \leq cap_{r,\tau}^s + mh_{r,\tau}^s \quad \forall r=1..R, \forall \tau \in HP^s \quad (1.3)$$

La contrainte (1.3) limite la réalisation de la production par la capacité disponible pour chaque ressource, en prenant en compte les heures supplémentaires qui lui sont allouées.

$$mh_{r,\tau}^s \leq hm_{r,\tau}^s \quad \forall r=1..R, \forall \tau \in HP^s \quad (1.4)$$

La contrainte (1.4) garantit le respect du volume maximal des heures supplémentaires allouables à la ressource r pour la période  $\tau$ .

- Gel des décisions selon leur délai d'anticipation (2)

$$mx_{i,\tau}^s = bx_{i,\tau-lb_{x_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lb_{x_i}, \theta^f] \quad (2.1)$$

$$my_{i,\tau}^s = by_{i,\tau-lb_{y_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lb_{y_i}, \theta^f] \quad (2.2)$$

$$mf_{i,\tau}^s = bf_{i,\tau-lb_{f_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lb_{f_i}, \theta^f] \quad (2.3)$$

$$mh_{r,\tau}^s = bh_{r,\tau-lb_{h_r}}^s \quad \forall r=1..R \quad \forall \tau \in [\theta^s + lb_{h_r}, \theta^f] \quad (2.4)$$

$$ma_{j,\tau}^s = ba_{j,\tau-lb_{a_j}}^s \quad \forall j=1..J \quad \forall \tau \in [\theta^s + lb_{a_j}, \theta^f] \quad (2.5)$$

Les contraintes (2.1) à (2.5) expriment la relation du gel des décisions en début de phase de réalisation par les décisions respectives d'engagement de la phase d'anticipation. Il y a égalité entre les valeurs engagées en anticipation et les valeurs qui seront mises en œuvre à la réalisation et ce, pour toutes les décisions (production en interne, sous-traitance, achat de produits finis, allocation d'heures supplémentaires et achat de composants).

- Respect des délais de production (3)

$$qx_{i,\tau}^s = mx_{i,\tau-lm_{x_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lm_{x_i}, \theta f] \quad (3.1)$$

$$qy_{i,\tau}^s = my_{i,\tau-lm_{y_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lm_{y_i}, \theta f] \quad (3.2)$$

$$qf_{i,\tau}^s = mf_{i,\tau-lm_{f_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s + lm_{f_i}, \theta f] \quad (3.3)$$

$$qh_{r,\tau}^s = mh_{r,\tau-lm_{h_r}}^s \quad \forall r=1..R \quad \forall \tau \in [\theta^s + lm_{h_r}, \theta f] \quad (3.4)$$

$$qa_{j,\tau}^s = ma_{j,\tau-lm_{a_j}}^s \quad \forall j=1..J \quad \forall \tau \in [\theta^s + lm_{a_j}, \theta f] \quad (3.5)$$

Avec la même logique que l'ensemble des contraintes (2), les contraintes (3.1) à (3.5) assurent l'égalité entre les valeurs lancées au début de la phase de réalisation et les valeurs reçues à la fin de cette phase. Cela est également valable pour toutes les décisions (production en interne, sous-traitance, achat de produits finis, allocation d'heures supplémentaires et achat de composants).

b) Etat réel passé

- Prise en compte de l'état réel des stocks et des arriérés initiaux au début de chaque étape de planification « s » (4)

$$sp_{i,\theta^s-1}^s = \overline{sip}_i^s \quad \forall i=1..N \quad (4.1)$$

$$sc_{j,\theta^s-1}^s = \overline{sic}_j^s \quad \forall j=1..J \quad (4.2)$$

$$ar_{i,\theta^s-1}^s = \overline{air}_i^s \quad \forall i=1..N \quad (4.3)$$

Les contraintes (4.1), (4.2) et (4.3) initialisent les valeurs réelles des stocks au début de l'étape de planification « s », respectivement en produits finis, en stocks de composants et en arriérés de production.

- Prise en compte des valeurs réelles en fin de phase d'anticipation (5)

$$mx_{i,\tau}^s = \overline{bx}_{i,\tau-lb_{x_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lb_{x_i} - 1] \quad (5.1)$$

$$my_{i,\tau}^s = \overline{by}_{i,\tau-lb_{y_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lb_{y_i} - 1] \quad (5.2)$$

$$mf_{i,\tau}^s = \overline{bf}_{i,\tau-lb_{f_i}}^s \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lb_{f_i} - 1] \quad (5.3)$$

$$mh_{r,\tau}^s = \overline{bh}_{r,\tau-lb_{h_r}}^s \quad \forall r=1..R \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lb_{h_r} - 1] \quad (5.4)$$

$$ma_{j,\tau}^s = \overline{ba}_{j,\tau-lb_{a_j}}^s \quad \forall j=1..J \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lb_{a_j} - 1] \quad (5.5)$$

Les contraintes numérotées de (5.1) à (5.5) expriment la mise à jour, dans l'étape  $s$ , des valeurs d'engagement de la phase de réalisation par la valeur réelle de l'accomplissement de la phase d'anticipation correspondante et ce, pour toutes les décisions (production en interne, sous-traitance, achat de produits finis, allocation d'heures supplémentaires et achat de composants).

- Prise en compte des valeurs réelles en fin de phase de réalisation (6)

$$qx_{i,\tau}^s = \overline{mx}_{i,\tau-lm_{x_i}} \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lm_{x_i} - 1] \quad (6.1)$$

$$qy_{i,\tau}^s = \overline{my}_{i,\tau-lm_{y_i}} \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lm_{y_i} - 1] \quad (6.2)$$

$$qf_{i,\tau}^s = \overline{mf}_{i,\tau-lm_{f_i}} \quad \forall i=1..N \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lm_{f_i} - 1] \quad (6.3)$$

$$qh_{r,\tau}^s = \overline{mh}_{r,\tau-lm_{h_r}} \quad \forall r=1..R \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lm_{h_r} - 1] \quad (6.4)$$

$$qa_{j,\tau}^s = \overline{ma}_{j,\tau-lm_{a_j}} \quad \forall j=1..J \quad \forall \tau \in [\theta^s, \theta^s + lm_{a_j} - 1] \quad (6.5)$$

Les contraintes numérotées de (6.1) à (6.5) expriment la mise à jour, dans l'étape  $s$ , des quantités comptabilisées en fin de chaque phase de réalisation, une fois connues les quantités réelles obtenues et ce, pour toutes les décisions (production en interne, sous-traitance, achat de produits finis, allocation d'heures supplémentaires et achat de composants).

- Positivité des variables (7)

$$\begin{cases} bx_{i,\tau}^s & by_{i,\tau}^s & bf_{i,\tau}^s & ba_{j,\tau}^s & bh_{r,\tau}^s \\ mx_{i,\tau}^s & my_{i,\tau}^s & mf_{i,\tau}^s & ma_{j,\tau}^s & mh_{r,\tau}^s \\ qx_{i,\tau}^s & qy_{i,\tau}^s & qf_{i,\tau}^s & qa_{j,\tau}^s & qh_{r,\tau}^s \\ sp_{i,\tau}^s & sc_{j,\tau}^s & ar_{i,\tau}^s & & \end{cases} \quad \forall i=1..N, \forall j=1..J, \forall r=1..R, \forall \tau \in \mathbf{HP}^s \geq 0 \quad (7)$$

La contrainte (7) impose que toutes les variables décisionnelles manipulées soient positives ou nulles.

- Expression de la fonction coût total prévisionnel par période dans une étape de planification  $s$  (8)

$$\begin{aligned} cost_{\tau}^s &= costx_{\tau}^s + costc_{\tau}^s + cost_{\tau}^s \\ &\quad + costf_{\tau}^s + costh_{\tau}^s + costa_{\tau}^s \quad \forall \tau \in \mathbf{HP}^s \end{aligned} \quad (8)$$

avec :

$cost_{\tau}^s$  = fonction coût total prévisionnel pour la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$

$costx_{\tau}^s$  = coût prévisionnel de production interne dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$\text{cost}_\tau^s =$  coût prévisionnel d'achat de composants dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$\text{cost}_\tau^s =$  coût prévisionnel de sous-traitance dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$\text{cost}_\tau^s =$  coût prévisionnel d'achat de produits finis dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$\text{cost}_\tau^s =$  coût prévisionnel d'utilisation d'heures supplémentaires dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$\text{cost}_\tau^s =$  coût prévisionnel des arriérés dans la période  $\tau$  de l'étape de planification  $s$  (calculé sur la base des décisions prévisionnelles d'engagement)

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{i=1}^N (\text{csp}_{i,\tau}^s \times \text{sp}_{i,\tau}^s + \text{cx}_{i,\tau}^s \times \text{bx}_{i,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.1)$$

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{j=1}^J (\text{csc}_{j,\tau}^s \times \text{sc}_{j,\tau}^s + \text{ca}_{j,\tau}^s \times \text{ba}_{j,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.2)$$

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{i=1}^N (\text{cy}_{i,\tau}^s \times \text{by}_{i,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.3)$$

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{i=1}^N (\text{cf}_{i,\tau}^s \times \text{bf}_{i,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.4)$$

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{r=1}^R (\text{ch}_{r,\tau}^s \times \text{bh}_{r,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.5)$$

$$\text{cost}_\tau^s = \sum_{i=1}^N (\text{car}_{i,\tau}^s \times \text{ar}_{i,\tau}^s) \quad \forall \tau \in \text{HP}^s \quad (8.6)$$

- Fonction objectif relative au coût en prévisionnel d'une étape de planification  $s$

$$\text{FcpHP}^s = \min \sum_{\tau=\theta^s}^{\theta^s} \text{G cost}_\tau^s \quad (9)$$

Cette fonction objectif s'intéresse à minimiser la somme des coûts totaux sur l'horizon de planification relatif à l'étape de planification «  $s$  ».

- Expression de la fonction coût total réel par période de planification (10)

Comme son nom l'indique, la fonction coût global prévisionnel est calculée à chaque étape de planification sur la base des valeurs des décisions d'engagement ( $\text{be}_{i,\tau}^s$ ) dont certaines sont encore prévisionnelles. Elle constitue la fonction objectif de l'étape de planification.

Par contre, la fonction coût global réel est calculée exclusivement à partir des valeurs réelles ( $\overline{\text{be}}_{i,\tau}$ ) enregistrées au fur et à mesure de l'implémentation de ces décisions. Elle constitue le résultat final servant à mesurer la performance économique de l'entreprise. A

chaque nouvelle étape de planification, les valeurs des décisions sur les PP périodes précédant le nouvel horizon de planification sont considérées comme définitives et sont intégrés dans le calcul du coût global réel.

La figure III-6 illustre les différents intervalles de périodes sur lesquels le calcul des coûts est effectué progressivement.

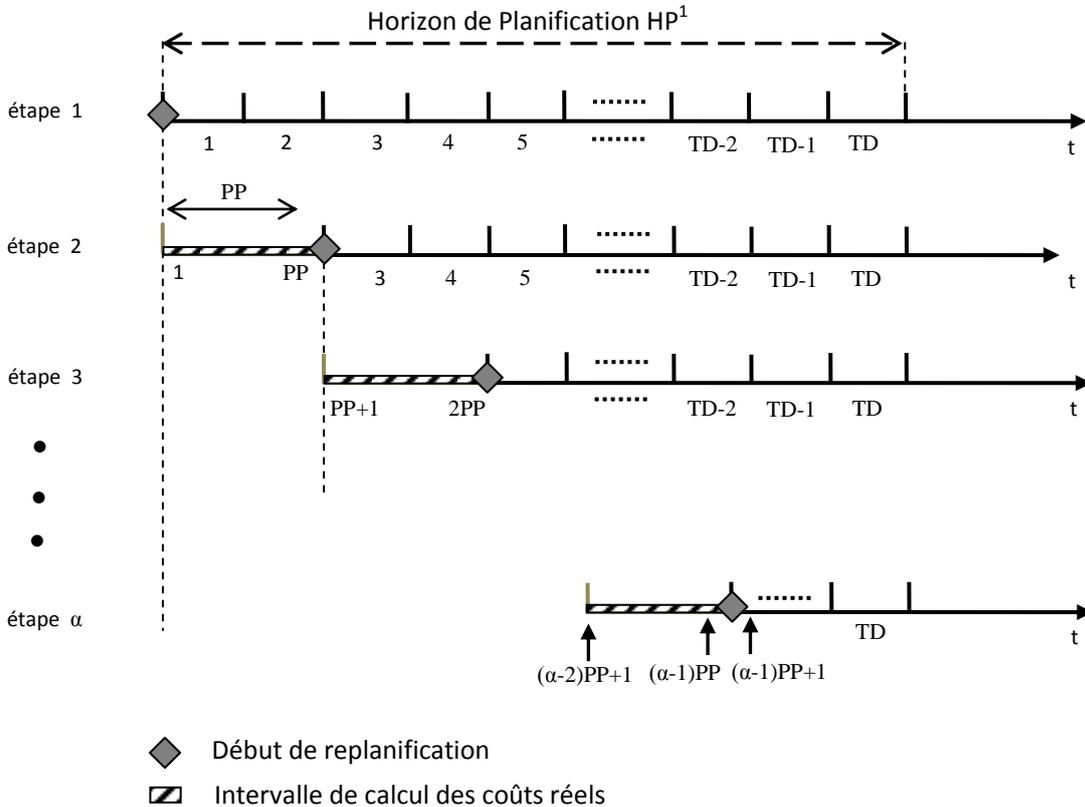


Figure III-6 Intervalles de calcul du coût global

On a  $\alpha$  étapes de planification, avec  $\alpha =$  valeur entière inférieure du rapport  $TD/PP$ . Pour  $s=2$ , le calcul est effectué sur l'intervalle de périodes  $[1, ..PP]$ . Pour  $s=3$ , le calcul est effectué sur l'intervalle de périodes  $[PP+1, ..2PP]$ , etc. Pour  $s=\alpha$ , le calcul est d'abord effectué sur l'intervalle de périodes  $[(\alpha-2)PP+1, ..(\alpha-1)PP]$  puis, en fin de simulation, sur le dernier intervalle  $[(\alpha-1)PP+1, ..TD]$ .

La formulation se présente comme suit :

$\overline{\text{cos } t_\tau}$  = fonction coût total réel pour la période  $\tau$

$$\alpha = \left\lfloor \frac{TD}{PP} \right\rfloor \quad (10.1)$$

$$\overline{\text{cos } t} = \sum_{s=2}^{\alpha} \left( \sum_{\tau=(s-2)PP+1}^{(s-1)PP} \overline{\text{cos } t_\tau} \right) + \sum_{\tau=(\alpha-1)PP+1}^{TD} \overline{\text{cos } t_\tau} \quad (10.2)$$

$$\overline{\text{cost}} = \sum_{i=1}^N \left( \text{csp}_{i,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{sp}}_{i,\tau} + \text{cx}_{i,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{bx}}_{i,\tau} + \text{cy}_{i,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{by}}_{i,\tau} \right) + \quad \forall s=1.. \alpha \quad (10.3)$$

$$\sum_{r=1}^R \left( \text{ch}_{r,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{bh}}_{r,\tau} \right) + \sum_{j=1}^J \left( \text{csc}_{j,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{sc}}_{j,\tau} + \text{ca}_{j,\tau}^{s-1} \times \overline{\text{ba}}_{j,\tau} \right)$$

Le modèle  $M^s$ , que nous proposons, permet au responsable de planifier ses décisions, d'une manière optimale, mais pour une étape bien particulière « s ». Ainsi, la possibilité de construire l'ensemble des décisions qui sont prises à chaque étape de planification ne sera pas faisable en utilisant le modèle  $M^s$  à lui seul. C'est dans cette perspective que nous allons intégrer notre modèle dans un outil de simulation permettant de simuler le processus complet de planification.

Dans le paragraphe suivant, le fonctionnement de cet outil sera détaillé, avant de l'utiliser pour simuler une planification dans un contexte d'incertitude sur la demande.

### 3 Simulation du processus dynamique de planification dans un contexte incertain

#### 3.1 Fonctionnement de l'outil de simulation

L'outil de simulation que nous avons développé a été construit autour du modèle mathématique  $M^s$ .

Le fonctionnement général de cet outil est représenté par la figure III-7. La mise en œuvre de l'outil débute par une initialisation des différentes données statiques et dynamiques du problème. On définit, entre autres, les stocks initiaux et l'état réel des dernières décisions d'anticipation engagées avant le début de l'horizon de planification considéré. Une fois l'initialisation terminée, on effectue la première étape de planification ( $s=1$ ) sur la base des données de l'horizon de planification correspondant  $HP^1$  (demandes, coûts, capacités). On passe ensuite à la deuxième étape de planification ( $s=2$ ) que l'on effectue sur la base des données actualisées de l'horizon  $HP^2$  commençant à la période  $PP+1$ . Toutes les décisions dont l'indice temporel est inférieur à  $PP+1$  sont alors considérées comme étant implémentables telles quelles et leur coût est évalué ; les valeurs des décisions et des coûts sont reportées comme composantes du plan de planification réel final. La simulation se poursuit jusqu'à la dernière étape qui est effectuée sur l'horizon prévisionnel se terminant à TD.

L'outil de simulation est développé dans le langage Java, sous l'éditeur Eclipse Ganymede. La résolution des modèles linéaires est réalisée par le solveur commercial Cplex 12.0 via sa bibliothèque de classe Java. La lecture des données est effectuée via la lecture de fichiers Excel (Microsoft), en utilisant la bibliothèque Apache HSSF.

Cet outil entend permettre d'étudier le comportement global de notre approche face à des exemples de problèmes de planification confrontés à un contexte incertain et de comparer ses performances à celles d'autres approches. La comparaison avec des

approches utilisant la notion d'horizon gelé classique nous a intéressé plus particulièrement. Dans le paragraphe suivant, nous développons les simulations qui ont été réalisées dans ce but et nous analysons les résultats obtenus.

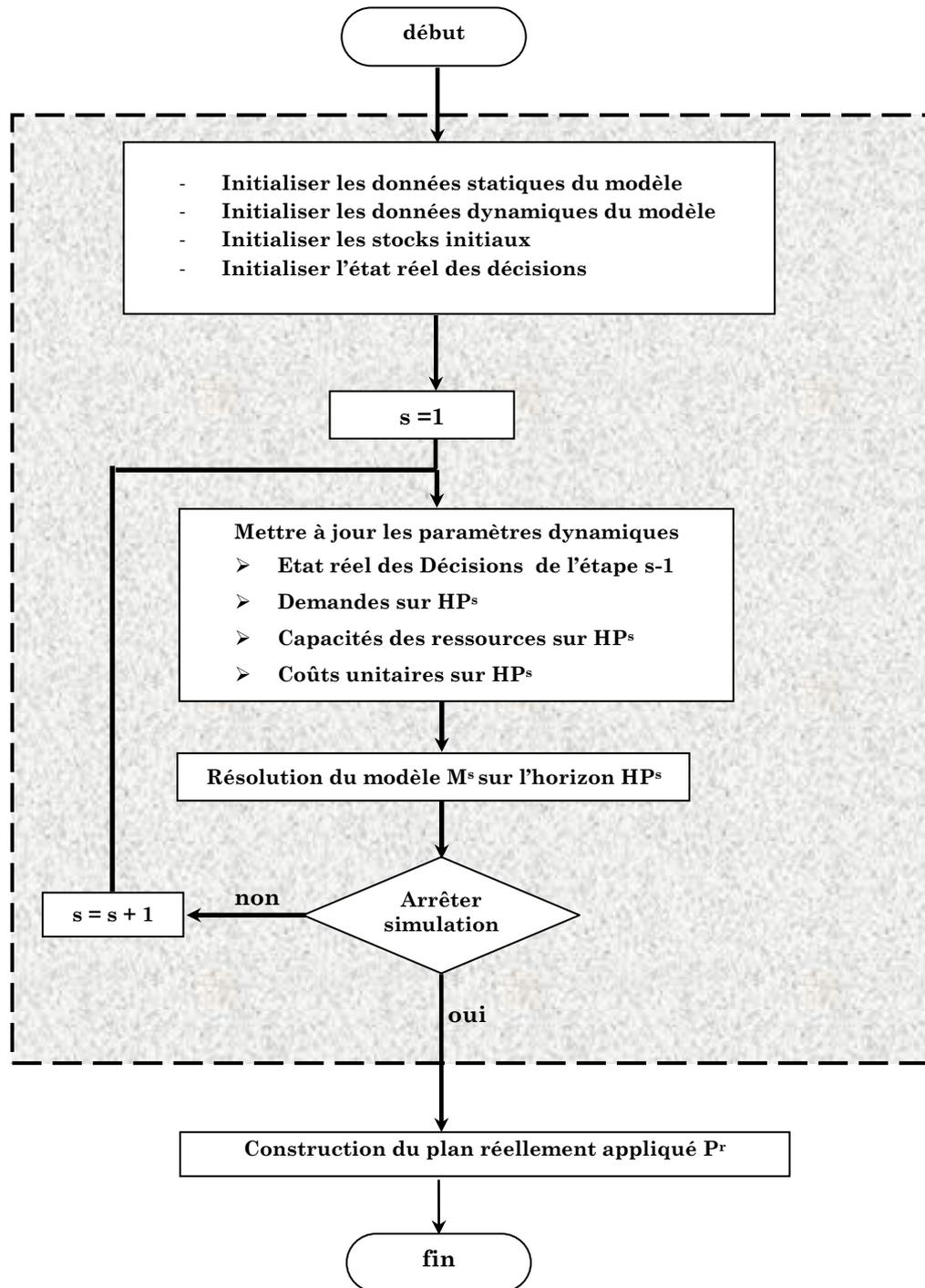


Figure III-7 Fonctionnement général de l'outil de simulation

### 3.2 Expérimentation et analyse de résultats

La comparaison que nous avons ciblée est établie à partir des plans réels de production générés selon les deux approches évoquées.

### 3.2.1 Caractéristiques de l'exemple de production considéré

Signalons d'emblée que cet exemple a été conçu à des fins d'illustration pédagogique et ne reflète pas un cas réel précis. Nous nous sommes restreints à une activité d'assemblage qui réalise trois produits finis (P1, P2 et P3) en ayant recours à deux types différents de composants (O1 et O2). La nomenclature de chacun des trois produits est donnée par la figure III-8 suivante.

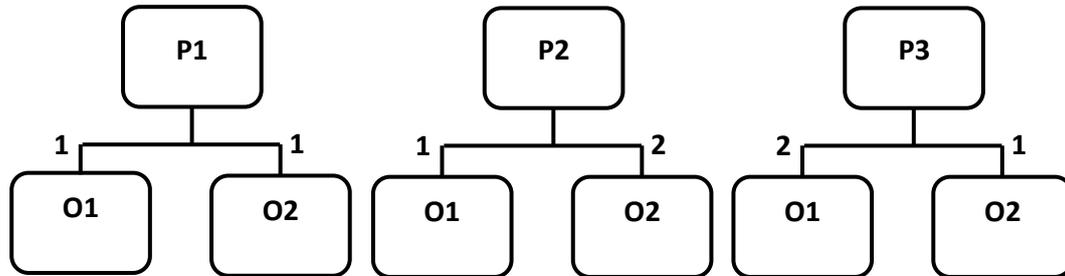


Figure III-8 Nomenclatures des produits P1, P2 et P3

Les nomenclatures sont choisies volontairement simples pour ne pas compliquer l'exemple. En outre, les composants sont supposés être approvisionnés auprès d'un seul fournisseur et l'assemblage des produits en interne est supposé être réalisé par une même ressource R1. Chaque produit consomme 1 unité temporelle (ut) de la ressource R1 afin d'accomplir sa production en interne. Chaque type de décision est caractérisé par son délai d'anticipation et son délai de réalisation. Nous avons exclu l'achat de produits finis. Le tableau III-1 détaille les différents délais selon le type de décision. Ces délais sont exprimés en périodes.

Type de décision	DELAI ANTICIPATION	DELAI REALISATION
Production en interne P1	1	1
Production en interne P2	2	1
Production en interne P3	4	1
Sous-traitance P1	2	2
Sous-traitance P2	2	2
Sous-traitance P3	1	2
Achat composant O1	1	0
Achat composant O2	1	0
Heures supplémentaires R1	1	0

Tableau III-1 Les délais d'anticipation et de réalisation des différentes décisions selon notre approche

Nous adoptons un horizon de planification de 20 périodes. Sur cet horizon, les différents coûts unitaires d'engagement relatif à chaque type de décision ainsi que les différents coûts unitaires de stockage de produits finis, de stockage de composants et d'arriérés de production sont donnés dans le tableau III-2.

Toujours pour des raisons de simplification, nous avons opté pour des coûts unitaires qui sont constants tout au long de l'horizon de planification et qui sont gardés invariables pour les différentes étapes de planification. Toutefois, la structure du modèle mathématique que nous avons développé permet d'intégrer des coûts variables qui peuvent être définis de façon spécifique à chaque période de chaque étape.

Les limitations de capacité se présentent comme suit :

- La capacité de la ressource R1 est fixée à 150 ut par période,
- Le volume maximal d'heures supplémentaires allouables par période est de 10 ut.

Les conditions initiales sur les stocks sont :

- Des stocks et des arriérés nuls pour tous les produits
- Des stocks nuls pour tous les composants

	Horizon de planification : périodes de 1 à 20
Coût unitaire d'engagement de Production en Interne d'une unité de P1	2
Coût unitaire d'engagement de Production en Interne d'une unité de P2	2
Coût unitaire d'engagement de Production en Interne d'une unité de P3	3
Coût unitaire d'engagement de Sous-traitance d'une unité de P1	15
Coût unitaire d'engagement de Sous-traitance d'une unité de P2	15
Coût unitaire d'engagement de Sous-traitance d'une unité de P3	15
Coût unitaire d'engagement d'Achat d'une unité du composant O1	1
Coût unitaire d'engagement d'Achat d'une unité du composant O2	2
Coût unitaire d'engagement d'une heure supplémentaire sur R1	2
Coût unitaire du stockage d'un produit P1	2
Coût unitaire du stockage d'un produit P2	2
Coût unitaire du stockage d'un produit P3	2
Coût unitaire du stockage d'un composant O1	1
Coût unitaire du stockage d'un composant O2	1
Coût unitaire d'un arriéré du produit P1	100
Coût unitaire d'un arriéré du produit P2	100
Coût unitaire d'un arriéré du produit P3	100

**Tableau III-2 Les coûts unitaires d'engagement des décisions, de stockage et d'arriérés**

La demande client est supposée évoluer au cours des différentes étapes de planification.

### 3.2.2 Evolution de la demande client

Dans la pratique industrielle, les demandes client se répartissent en deux catégories : les demandes fermes et les demandes flexibles [Galasso, 07] [Genin, 03] [Rota, 98].

Les demandes fermes constituent des demandes définitives qui ne changent pas d'un pas de planification à un autre. Elles sont précisées sur un horizon temporel appelé horizon ferme. Généralement, l'horizon ferme se compose d'un certain nombre de périodes s'alignant sur l'échéance de la planification et pour lesquelles le client s'engage auprès du fournisseur à ne pas changer ses commandes même si son besoin réel varie entre temps. Il accepte le risque d'avoir des quantités qui pourront se révéler aussi bien supérieures qu'inférieures à ses exigences réelles et qui peuvent ainsi générer un stock plus grand ou une rupture.

Quant aux demandes flexibles, elles sont considérées comme des demandes prévisionnelles qui peuvent fluctuer dans un intervalle défini, appelé intervalle de flexibilité. Un tel intervalle délimite la variation maximale de la demande prévisionnelle, en hausse et en baisse, à laquelle le producteur devra s'adapter [Galasso, 07]. La demande flexible est spécifiée sur un horizon temporel qualifié d'horizon flexible et est précisée au fur et à mesure de l'évolution dans le temps, avec un délai préalablement court. La variation de la demande flexible est souvent exprimée sous forme d'un pourcentage qui permet de calculer les bornes de l'intervalle de flexibilité pour chaque période de l'horizon flexible [Galasso, 07]. Dans tous les cas, il est établi une sorte de commande-contrat entre l'entreprise fournisseur et le client qui fixe les termes de la demande, ses horizons ferme et flexible et le degré de flexibilité éventuelle.

Dans le cas de notre exemple, l'évolution de la demande client suit le même schéma que nous venons de présenter ci-dessus. Ainsi, à chaque étape de planification « s », l'horizon de la demande client est décomposé en un horizon ferme et un horizon flexible comme le montre la figure III-9. Nous avons retenu un horizon ferme de 3 périodes est une périodicité de planification de 2 périodes.

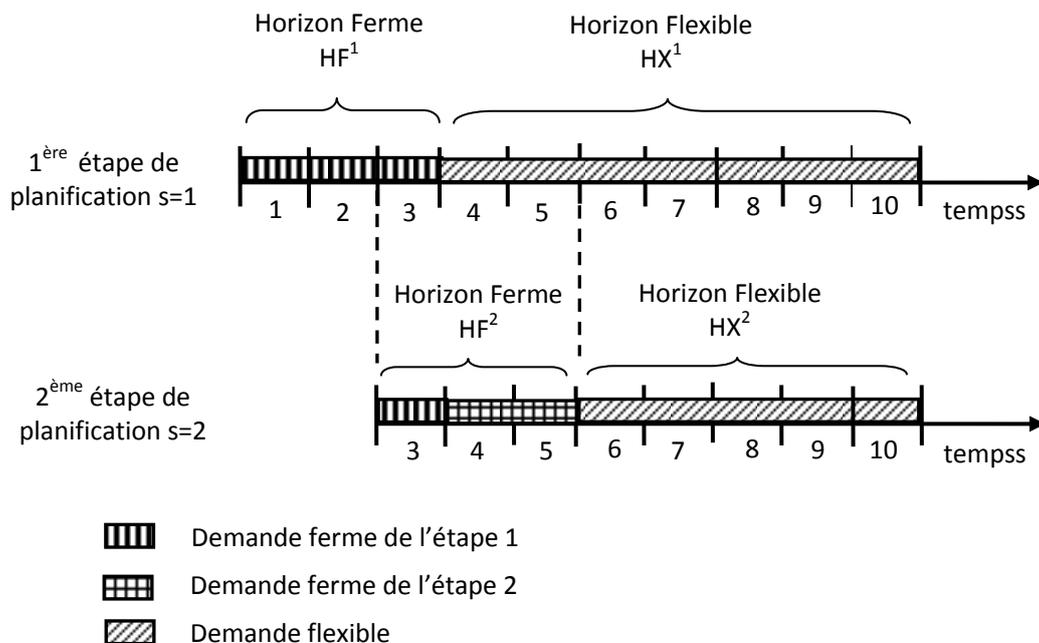


Figure III-9 Décomposition de l'horizon de la demande client

Dans la simulation, nous générons, pour chaque produit  $i$ , un profil initial prévisionnel de la demande client. Ce profil initial aura un double rôle dans l'évolution de la demande au cours des différentes étapes de planification. Dans un premier temps, il va constituer la demande prévisionnelle considérée à la première étape de planification ( $s = 1$ ). Dans un second temps, il sera la base de la génération aléatoire des profils de la demande pour les étapes de planification suivantes. Cette génération aléatoire de la demande est effectuée, pour chaque période appartenant à l'horizon de planification  $HP^s$ , excepté la(les) période(s) qui fait (font) l'intersection entre l'horizon ferme de l'étape de planification précédente et celui de l'étape courante. Sur cette (ces) période(s), la demande est gardée inchangée entre les deux étapes successives de planification  $s$  et  $s+1$ . Le tirage aléatoire se fera selon une loi Normale ayant comme espérance la demande de la période concernée dans le profil initial et comme variance un pourcentage préfixé. Dans notre simulation, nous avons choisi un pourcentage de 20%, ce qui signifie que, à chaque étape de planification, la demande pourra avoir une variation maximale de 20%, en baisse ou en hausse, de sa valeur initiale prise en compte à l'étape  $s=1$ . Ainsi, l'évolution de la demande client entre deux étapes successives de planification est formalisée comme suit :

$$d_{i,\tau}^s = d_{i,\tau}^{s-1} \quad \forall i = 1..N \quad \forall \tau \in HF^{s-1} \cap HF^s \quad (11)$$

$$d_{i,\tau}^s \approx \text{Loi.Normale} \left( d_{i,\tau}^1, 0.2 \times d_{i,\tau}^1 \right) \quad \forall i = 1..N \quad \forall \tau \in HX^s \cup \{HX^{s-1} \cap HF^s\} \quad (12)$$

La périodicité de la planification étant fixée à 2 périodes, nous établissons, au début de chaque étape de replanification, une mise à jour de la demande prévisionnelle en gardant inchangée les demandes des trois premières périodes constituant l'horizon ferme.

Les tableaux III-3, III-4 et III-5 ci-dessous détaillent l'évolution de la demande client pour les trois produits P1, P2 et P3 et pour chaque étape de planification. La première ligne de chaque tableau présente le profil initial prévisionnel de la demande qui est lu avant le début du processus de planification. Les lignes qui suivent montrent le profil de la demande actualisée avant d'entamer l'étape de planification correspondante. Les cases encadrées correspondent à la demande ferme qui restera invariante d'un pas de planification au pas suivant. Quant aux cases en gris, elles correspondent à la demande passée qui a été prise en compte lors des étapes antérieures.

La figure III-10 synthétise la charge globale de production induite par la demande des 3 produits (P1, P2 et P3) et situe les capacités possibles en production en interne.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
s=1	38	33	39	31	39	106	110	110	59	62	40	31	36	32	32	38	34	86	89	104
s=2	38	33	39	25	33	112	120	112	58	60	37	30	36	35	29	40	36	86	87	102
s=3	38	33	39	25	33	110	121	112	66	54	41	28	38	33	29	36	34	80	91	98
s=4	38	33	39	25	33	110	121	108	63	61	40	31	36	29	30	39	32	87	91	100
s=5	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	28	37	32	29	39	36	88	85	101
s=6	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	25	42	32	33	35	36	82	94	108
s=7	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	25	42	26	37	40	38	82	87	99
s=8	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	25	42	26	37	33	40	80	79	106
s=9	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	25	42	26	37	33	40	95	98	115

Tableau III-3 Evolution de la demande de P1 au cours des étapes de planification

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
s=1	35	30	30	30	39	101	87	99	52	63	36	38	32	32	34	37	32	105	84	87
s=2	35	30	30	24	39	105	91	105	56	63	34	38	26	29	29	38	33	106	91	87
s=3	35	30	30	24	39	104	96	106	54	68	33	38	32	33	28	42	32	101	88	87
s=4	35	30	30	24	39	104	96	109	55	60	37	38	30	29	32	35	32	107	77	80
s=5	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	35	31	32	32	40	30	109	84	87
s=6	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	42	31	34	33	37	30	100	83	85
s=7	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	42	31	35	29	37	30	100	89	92
s=8	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	42	31	35	29	34	37	112	84	82
s=9	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	42	31	35	29	34	37	108	74	96

Tableau III-4 Evolution de la demande de P2 au cours des étapes de planification

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
s=1	34	31	40	31	31	95	94	87	65	56	32	36	35	37	30	35	40	97	96	102
s=2	34	31	40	27	25	95	90	83	66	52	30	36	37	40	28	36	42	98	96	102
s=3	34	31	40	27	25	91	104	90	64	58	30	39	39	35	30	33	39	94	93	102
s=4	34	31	40	27	25	91	104	89	73	55	33	33	35	33	30	31	40	93	98	93
s=5	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	35	33	37	28	36	34	98	99	102
s=6	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	37	41	31	29	41	38	93	96	93
s=7	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	37	41	34	29	33	39	93	93	97
s=8	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	37	41	34	29	28	46	105	97	103
s=9	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	37	41	34	29	28	46	94	106	113

Tableau III-5 Evolution de la demande de P3 au cours des étapes de planification

Plus précisément, nous avons synthétisé la charge globale initiale relative à la première étape de planification (s=1). Cette charge a été calculée sur la base du coefficient de consommation de la ressource r, pour chaque type de produit, fixé à 1 unité temporelle.

Nous avons positionné cette charge globale initiale par rapport aux capacités cumulées autorisées par la production en interne et l'utilisation des heures supplémentaires. Nous rappelons que le recours à la sous-traitance est, par hypothèse, considéré comme illimité, ce qui explique l'absence de la capacité de sous-traitance dans la figure.

Deux pics de charge apparaissent, relativement à la capacité cumulée interne du système sans recours à la sous-traitance. Le premier pic se situe sur les périodes 6 à 8 et le deuxième pic touche les périodes 18 à 20. Nous sommes donc confrontés à un problème de sous-capacité interne (capacité de production en interne et capacité d'heures supplémentaires). Dans ce contexte, notre outil de simulation va déterminer les décisions adéquates pour ajuster la charge et la capacité à moindre coût. Le déroulement de la simulation ainsi que l'analyse des résultats sont décrits dans les paragraphes suivants.

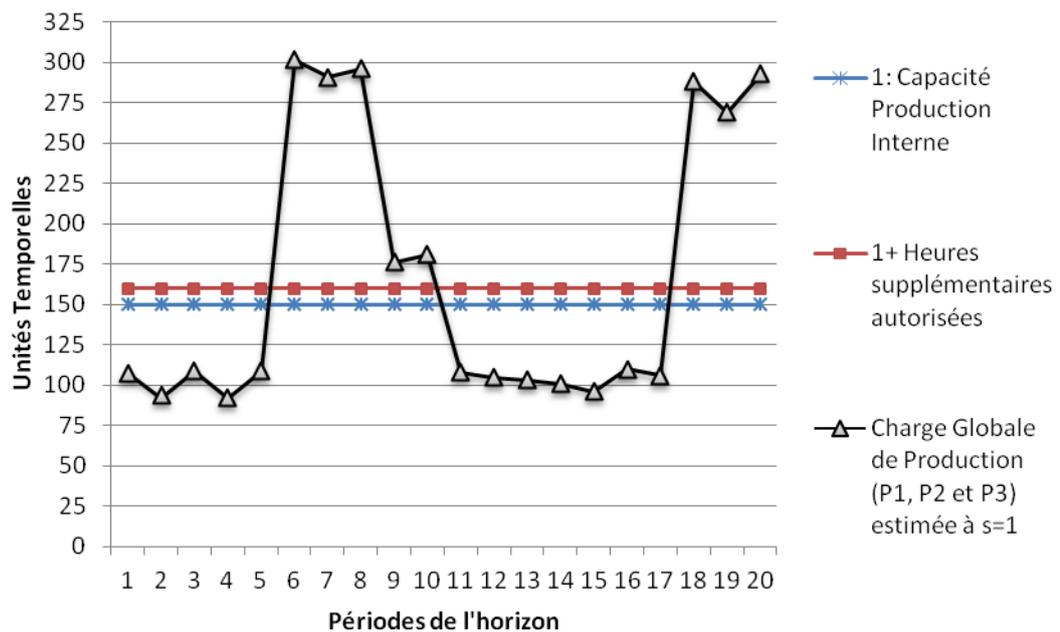


Figure III-10 Positionnement de la charge globale initiale par rapport aux capacités cumulées

### 3.2.3 Description du déroulement de la simulation

#### 3.2.3.1 Objectif et étapes de la simulation

Comme nous l'avons annoncé plus haut, notre objectif est de comparer notre approche avec une approche adoptant une planification à horizon gelé.

La figure III-11 illustre l'évolution de la prise de décision dans le contexte d'une planification à horizon glissant (rétrécissant) en adoptant un horizon gelé de deux périodes.

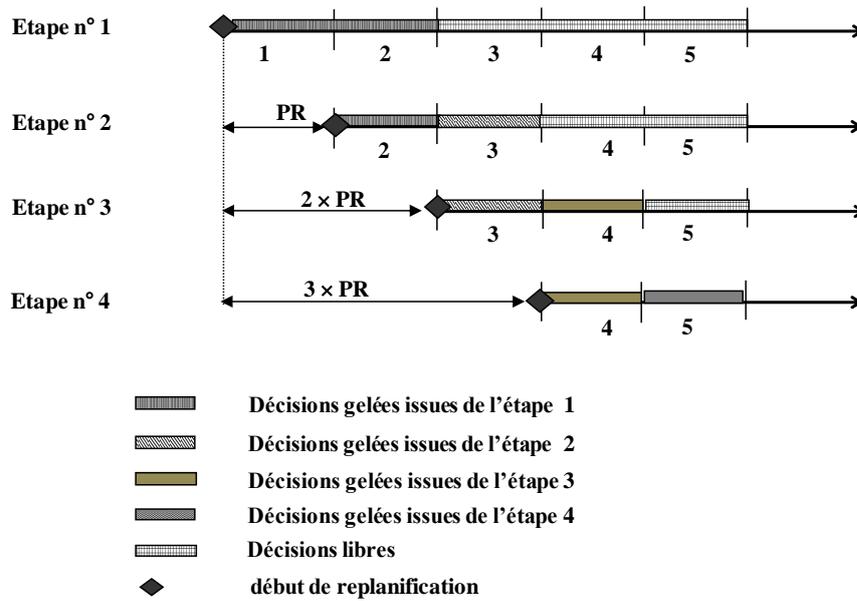


Figure III-11 Fonctionnement général d'une planification à horizon glissant en adoptant un Horizon Gelé de deux périodes Gelé

Nous avons choisi d'effectuer la comparaison des résultats de notre approche avec ceux de l'approche utilisant un horizon gelé de 4 périodes, soit le maximum des délais d'anticipation de l'exemple considéré (Tableau III-1). De la manière dont nous effectuons la simulation en prenant en compte une initialisation détaillée, le traitement du cas de l'exemple sous horizon gelé de 4 périodes revient quasiment à traiter le même exemple avec un délai d'anticipation de 4 périodes pour toutes les décisions (tableau III-6).

Type de décision	DELAI ANTICIPATION	DELAI REALISATION
Production en Interne P1	4	1
Production en Interne P2	4	1
Production en Interne P3	4	1
Sous Traitance P1	4	2
Sous Traitance P2	4	2
Sous Traitance P3	4	2
Achat composant O1	4	0
Achat composant O2	4	0
Heures supplémentaires R1	4	0

Tableau III-6 Les délais d'anticipation et de réalisation des différents décisions selon une approche à horizon gelé

Le déroulement de la simulation se fait en deux parties. La première partie réalise une résolution numérique du problème de planification déjà caractérisé, en adoptant des délais d'anticipation spécifiques à chaque type de décision (Tableau III-1). La résolution numérique se fait d'une manière dynamique en effectuant plusieurs étapes de planification. Ainsi, à chaque étape de planification, nous prenons en compte la mise à jour de la demande client selon les profils présentés dans les tableaux III-3, III-4 et III-5, et nous générons le plan de production correspondant à cette étape. A la fin de ce processus, nous construisons le plan réellement implémenté par concaténation des différentes

décisions réelles finales relatives à chaque étape de planification. Le plan résultant de cette première partie constitue le plan de production réel obtenu selon notre approche. La deuxième partie, reprend la même démarche suivie dans la première, en s'imposant un horizon gelé de 4 périodes. Le plan résultant constitue le plan de production réel obtenu selon l'approche à horizon gelé.

Nous comparons, par la suite, les résultats des deux approches selon certains critères simples tels que le volume des arriérés ou le coût réel total de la production. Nous élaborons, en plus, un indicateur de taux de service par période et par produit qui mesure le taux de satisfaction de la demande client pour chaque période de l'horizon de planification [Gharbi et al. 09]. Cet indicateur sera calculé sur les résultats finaux du plan réel.

Le taux de service du produit  $i$  pour la période  $\tau$  est :

$$ts_{i,\tau} = \left( \frac{ar_{i,\tau-1} - sp_{i,\tau-1} + d_{i,\tau} - ar_{i,\tau}}{ar_{i,\tau-1} + d_{i,\tau} - sp_{i,\tau-1}} \right) \quad \forall i = 1..N \quad \forall \tau = 1..TD \quad (vii)$$

Le taux de service moyen du produit  $i$  s'écrit comme suit:

$$ts_i = \frac{1}{TD} \sum_{\tau=1}^{TD} ts_{i,\tau} \quad \forall i = 1..N \quad (viii)$$

### 3.2.3.2 Le plan idéal

Nous entendons par plan idéal (PI) le plan qu'on aurait obtenu en une seule étape de planification si l'on avait eu connaissance, dès le début, de la demande réelle pour les trois produits sur la totalité de l'horizon de planification. En fait, cette demande réelle est celle de l'horizon prévisionnel auquel on aboutit à la dernière étape de notre processus dynamique de planification. Ainsi, les demandes réelles pour les produits P1, P2 et P3 correspondent à la dernière ligne respectivement des tableaux III-3, III-4 et III-5.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Dem. P1	38	33	39	25	33	110	121	108	63	63	46	25	42	26	37	33	40	95	98	115
Dem. P2	35	30	30	24	39	104	96	104	55	71	42	42	31	35	29	34	37	108	74	96
Dem. P3	34	31	40	27	25	91	104	89	73	52	37	37	41	34	29	28	46	94	106	113

Tableau III-7 Demande réelle des trois produits

Le calcul du plan idéal est effectué selon notre approche de planification (N.A) en adoptant les délais temporels spécifiés dans le tableau III-1. En se référant au plan idéal, nous pourrions positionner la performance des résultats obtenus par le processus de planification dynamique que nous exploitons via notre outil de simulation. Ceci nous permettra de mieux évaluer la performance de notre approche de planification dynamique vis-à-vis du plan idéal.

Dans ce contexte, et avant d'entamer la présentation numérique de la simulation effectuée, nous avons trouvé intéressant de présenter la charge induite par le plan idéal

ainsi que son positionnement par rapport à la demande initiale et la capacité interne cumulée. La figure III-12 illustre ces derniers aspects.

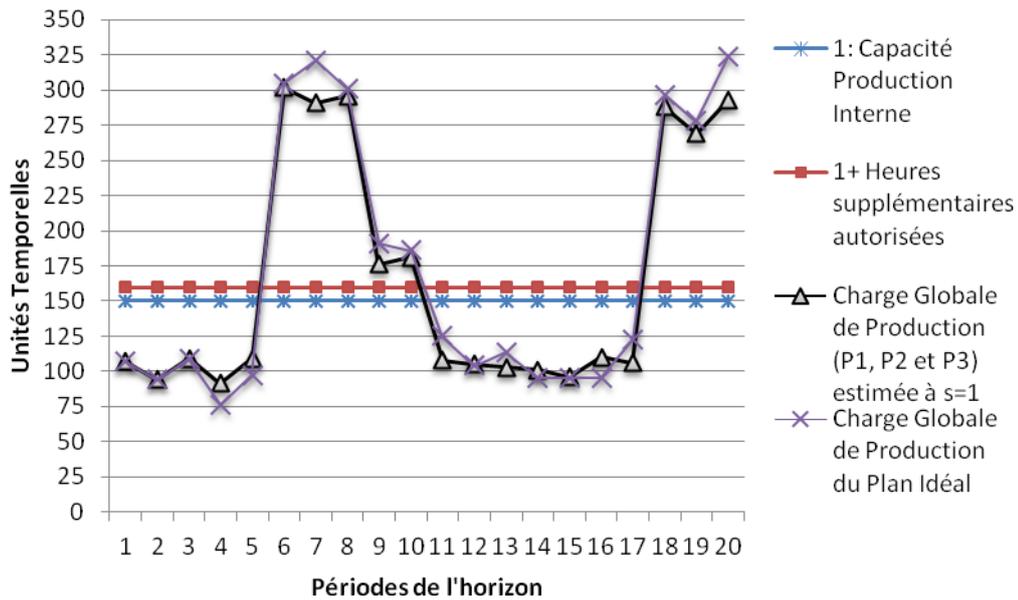


Figure III-12 Positionnement de la charge globale de production du problème traité et de la demande réelle

Comme nous pouvons le noter, la charge globale induite par le plan idéal (PI) garde la même allure que celle générée par le profil initial avec des pics plus accentué. Dans ce qui suit, nous détaillons les résultats numériques obtenus par la simulation que nous avons effectuée.

### 3.2.4 Résultats de la simulation

La comparaison entre les deux approches, celle qui adopte un horizon gelé et la notre modélisant un délai d'anticipation spécifique à chaque décision, s'appuie sur certains nombre d'éléments. Ces éléments sont issus des deux plans de production réels, résultant chacun, du processus de planification dynamique. Dans ce contexte, notre comparaison va porter sur des aspects budgétaires (coût réel total et coût réel total sans coûts des arriérés), sur des aspects de qualités de service (arriérés de production et indicateur de qualité de service) et sur des aspects d'utilisation des leviers d'augmentation de la capacité de la production (heures supplémentaires et sous-traitance). Le tableau III-8 présente, d'une manière globale, les résultats numériques se rapportant aux aspects évoqués pour chaque approche. Avant de procéder à l'analyse de ces résultats, il est important de remarquer que les valeurs numériques qui seront présentés se rapportent à des décisions d'engagement (du type « be » comme déjà vu dans le modèle mathématique).

Type de décision	Plan Idéal (PI)	Notre Approche (NA)	Approche à Horizon Gelé (AHG)
Coût Total Réel (CTR)	70550	82297	220652
CTR sans coût arriérés	32450	31897	36527
Total Heures Supp.	140	146	120
Total Sous-Traitance P1	0	18	236
Total Sous-Traitance P2	151	110	273
Total Sous-Traitance P3	551	536	601
Total Arriérés P1	109	145	724
Total Arriérés P2	195	291	909
Total Arriérés P3	204	236	822
Taux de service Moyen P1	90%	88%	68%
Taux de service Moyen P2	85%	78%	58%
Taux de service Moyen P3	85%	82%	64%

**Tableau III-8 Comparaison globale entre les deux approches**

Nous pouvons déduire, avec une analyse globale, que notre approche (NA) est plus compétitive que l'approche à horizon gelé (AHG) et ce, aussi bien pour l'aspect budgétaire que pour l'aspect qualité de service. En fait, NA permet de faire face à l'incertitude sur la demande avec un coût total réel qui est presque le tiers du coût total réel obtenu par AHG. Dans ce contexte, une grande partie de cette différence de coût est causé par le coût des arriérés générés par AHG comme le montre la deuxième rubrique du tableau III-8. En effet, nous constatons que NA permet d'obtenir des arriérés de production qui sont nettement inférieurs à ceux obtenus avec AHG, et ceci, pour les trois produits. Ceci explique bien le fait que NA réalise pour les trois produits, des taux de services moyens qui sont meilleurs que ce que permet de réaliser AHG. En ce qui concerne les résultats que présentent le plan idéal PI, nous pouvons examiner que NA ne s'écarte pas trop. Cette constatation est affirmée par la comparaison des taux de service moyen dont le plus grand écart ne dépasse pas 7% pour le deuxième produit.

La performance de notre approche NA est obtenue grâce à une meilleure exploitation des spécificités des délais d'anticipation de chaque décision. Cependant, le caractère global des résultats présentés dans le tableau III-8 ne permet pas de percevoir clairement une telle conclusion. C'est ainsi que nous proposons d'étudier plus en détail l'évolution de certains résultats sur l'horizon de planification à l'aide de graphiques qui offrent une plus grande représentativité.

Les figures III-13, III-14 et III-15 illustrent l'évolution des arriérés de production des produits P1, P2 et P3 sur l'horizon de planification. Ces valeurs sont extraites du plan de production réel obtenu à la fin du processus de planification dynamique.

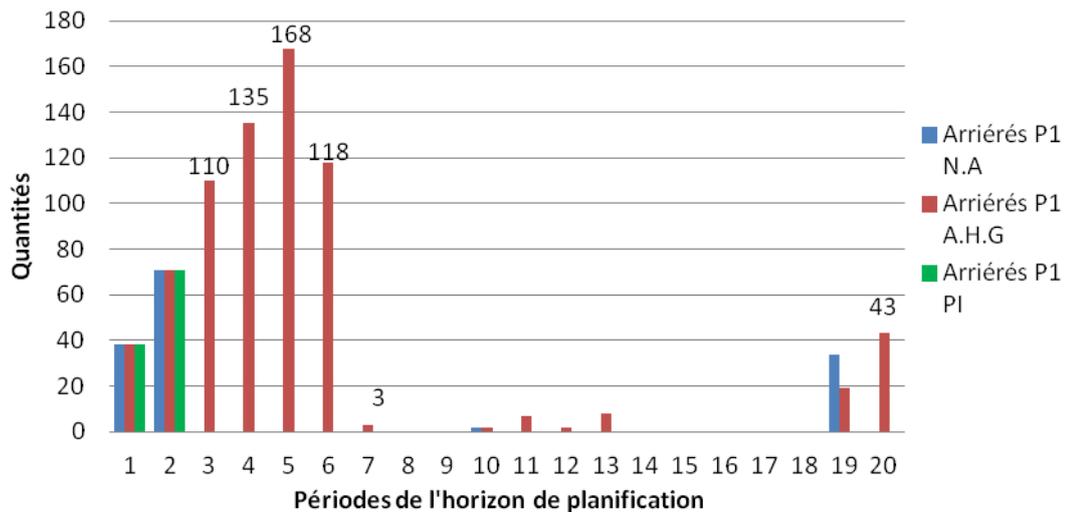


Figure III-13 Comparaison des arriérés de production de P1 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

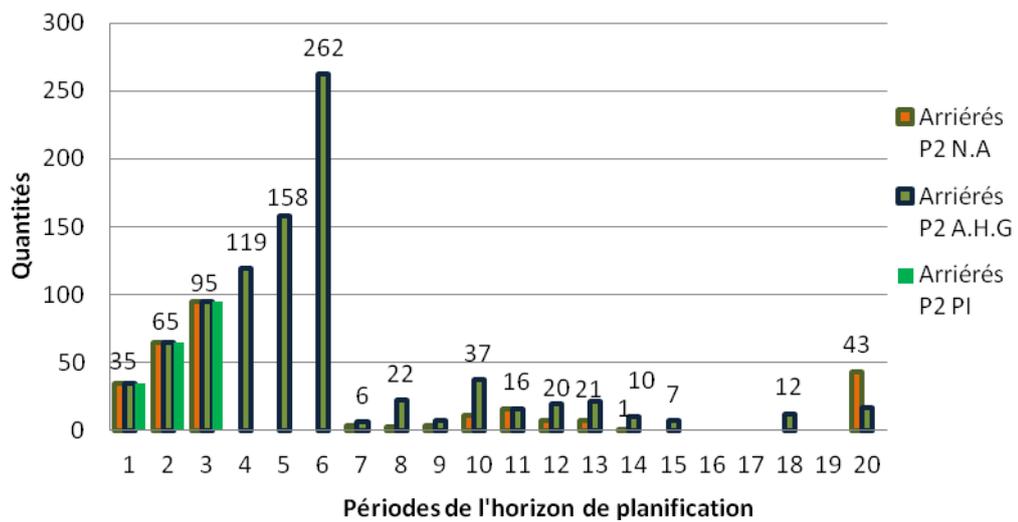


Figure III-14 Comparaison des arriérés de production de P2 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

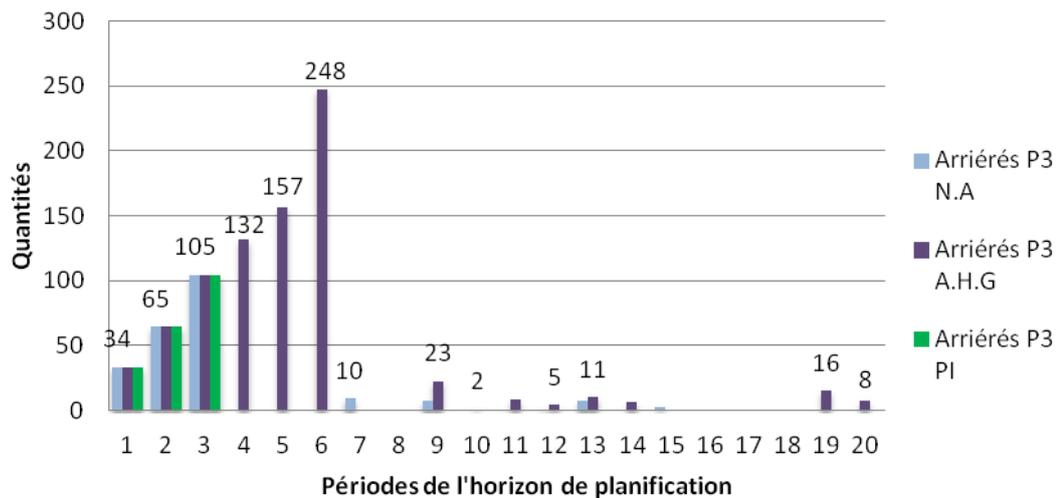


Figure III-15 Comparaison des arriérés de production de P3 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

Avant d'entamer l'analyse des figures ci-dessus et des figures qui vont suivre, il est important de porter attention à l'effet de l'état initial des stocks de produits finis et de composants qui ont été fixés tous les deux à des valeurs nulles. Ce choix nous amène à distinguer deux différents régimes lors de l'évolution de la planification :

- 1) Le premier régime, correspond à une phase transitoire dans laquelle le système cherche à construire ses stocks de composants pour commencer à lancer sa production en interne. En examinant le maximum des différents délais d'anticipation dans les deux approches, nous retenons la durée de quatre périodes (04) comme valeur maximale. Dans ce contexte, si un engagement d'achat est lancé dans la première période, les composants seront reçus à la période numéro cinq (05), et ce n'est au bout de la sixième période que les composants seront utilisés. Nous pourrions considérer alors les périodes allant de 01 à 06 comme un régime transitoire.
- 2) Le deuxième régime, équivaut à une phase permanente du travail de planification et s'étend sur les périodes allant de la période numéro sept (07) jusqu'à la fin de l'horizon.

Ainsi, nous constatons sur les figures III-13, 14 et 15, que notre approche NA permet de réduire la quantité des arriérés dans la phase du régime transitoire jusqu'à atteindre des arriérés nuls dès la troisième période pour P1, et dès la quatrième période pour P2 et P3. En revanche, sur cette même phase, AHG engendre des arriérés qui sont strictement croissants pour P2 et P3. Cependant, pour P1, les arriérés sont strictement croissants jusqu'à la cinquième période et diminuent à la sixième période tout en gardant une valeur importante. Dans ce contexte, l'incapacité de AHG à tenir une allure décroissante du volume des arriérés, pour les trois produits, est essentiellement due à l'utilisation d'un même horizon gelé de 4 périodes pour toutes les décisions. En effet, il n'existe aucune décision (ou combinaison de décisions) qui permet de réaliser des produits dans une durée qui est inférieure à 6 périodes afin de combler le cumule des arriérés, et ceci, sans tenir compte des incertitudes sur la demande qui doivent engendrer de nouvelles décisions

correctives. De même, l'examen du reste de l'horizon montre que NA crée beaucoup moins d'arriérés que AHG en ce qui concerne les trois produits. En effet, nous comptabilisons :

- 2 occurrences d'arriérés de P1 pour NA contre 7 occurrences pour AHG,
- 9 occurrences d'arriérés de P2 pour NA contre 11 occurrences pour AHG,
- 4 occurrences d'arriérés de P3 pour N.A contre 8 occurrences pour AHG.

Par rapport au plan idéal PI, la répartition des arriérés selon NA, est différente tout au long de l'horizon de planification. En effet, PI élimine définitivement les arriérés des trois produits dès le début du régime transitoire. Ce qui explique en fait, le niveau de service que présente PI pour chaque produit.

Dans ce même contexte, les stocks de produits finis générés donnent une idée complémentaire sur la qualité de service des différentes approches ainsi que sur l'adéquation entre la charge et la capacité adopté par chaque approche de planification. Les figures III-16, III-17 et III-18 illustrent cet aspect.

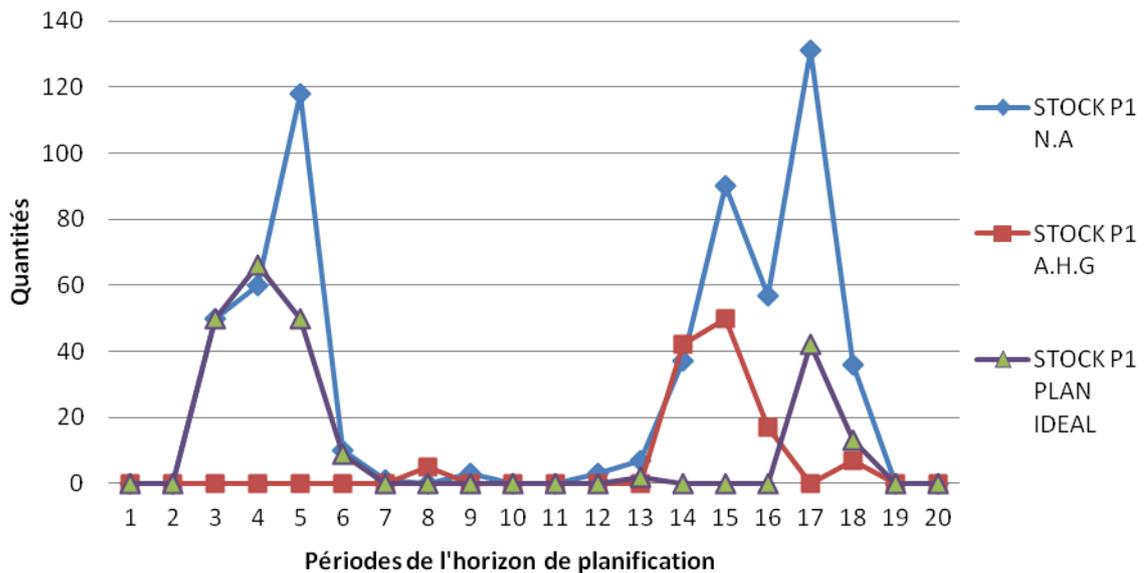


Figure III-16 Evolution du stock du produit P1 selon les différentes approches

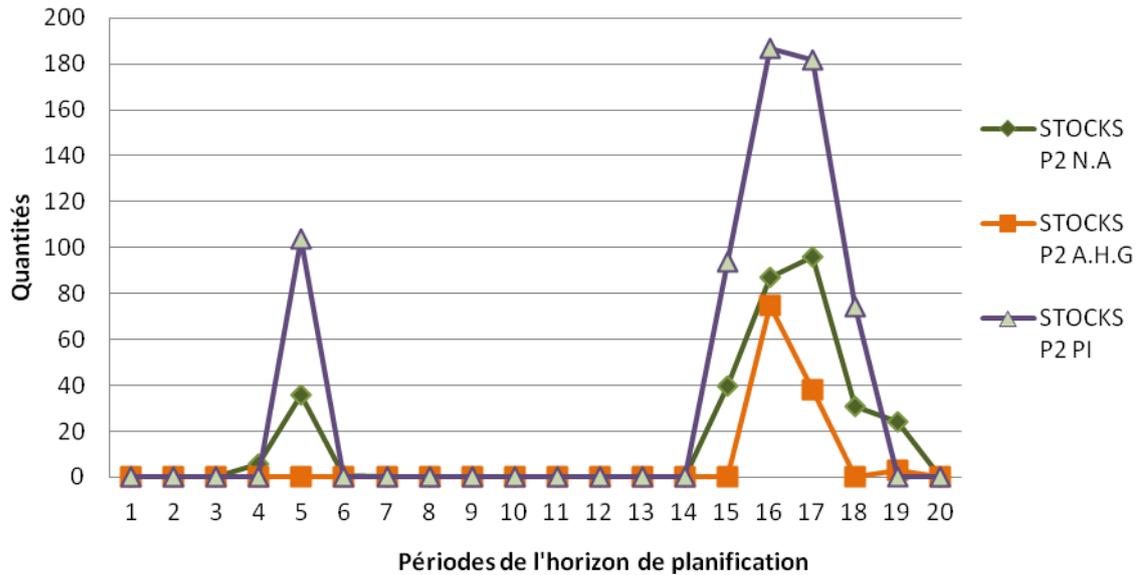


Figure III-17 Evolution du stock de P2 selon les différentes approches

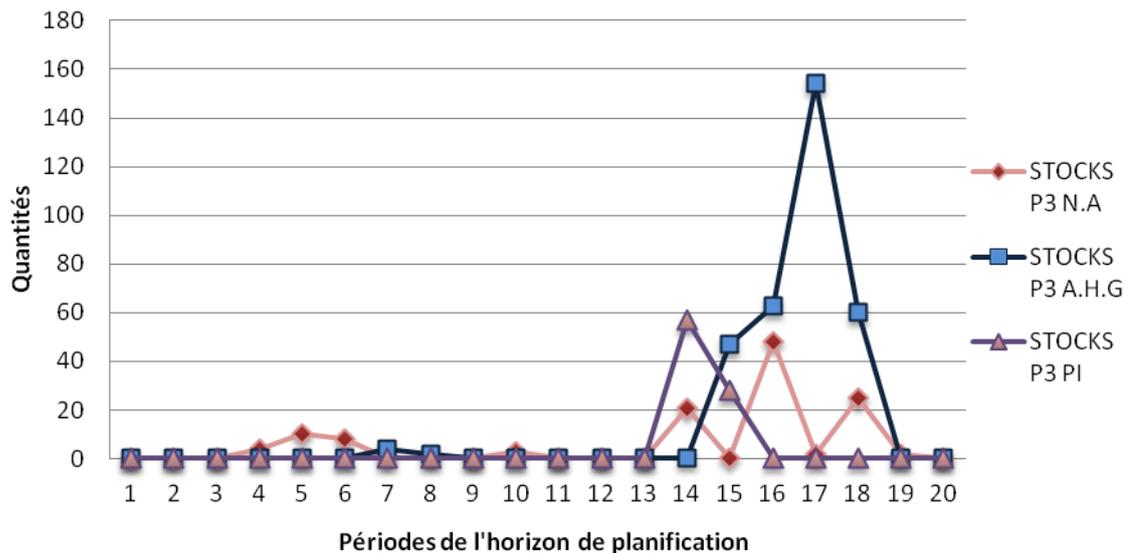


Figure III-18 Evolution du stock de P3 selon les différentes approches

La première constatation dégagée par les trois figures d'évolution des stocks des trois produits, est que la stratégie adoptée pour assurer l'adéquation de la capacité au pic de la charge est la production à l'avance pour la création de stocks. Cela est clair par les pics de stocks qu'affichent les trois figures, en ce qui concerne les deux approches NA et AHG. Cependant, NA génère un stock plus important que AHG, lui permettant ainsi de mieux faire face aux deux pics de la demande. Ceci explique encore la meilleure qualité de service qu'atteint NA face à AHG. En comparaison avec le plan idéal PI, nous constatons que NA génère des stocks plus grands pour les produits P1 et P3 ce qui explique la très faible différence entre les moyennes de qualités de services relatives à ces deux produits que permet de réaliser NA par rapport à PI (Tableau III-8). Toutefois, le stock du produit P2

que permet d'atteindre N.A est nettement plus petit que celui que présente PI, d'où une différence de qualité de service moyenne plus importante.

Toutes les constatations faites à l'aide des courbes d'évolution des arriérés et des stocks des trois produits se confirment par les figures III-19, III-20 et III-21. Ces courbes détaillent, pour chaque approche et pour chaque produit, l'évolution du taux de service sur les périodes de l'horizon de planification.

Il est clair que NA fournit, pour chaque produit, des taux de service qui ont, dans la plupart des périodes, des valeurs supérieures ou égales à celles présentées par l'approche AHG. Les taux de service nuls sont constatés dans la phase transitoire pour les deux approches. Toutefois, NA se rattrape plus rapidement sur cette phase transitoire. En examinant le plan idéal, nous voyons que les taux de service pour les trois produits sont identiques sur le régime transitoire du système entre NA et PI. La dégradation du taux de service de NA n'est relevée que sur le régime permanent.

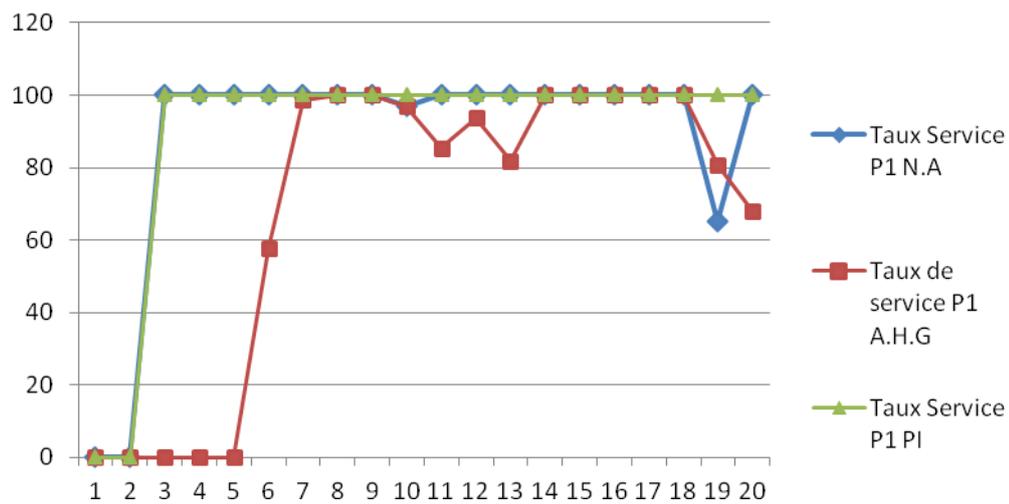


Figure III-19 Comparaison du taux de service par période de P1 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

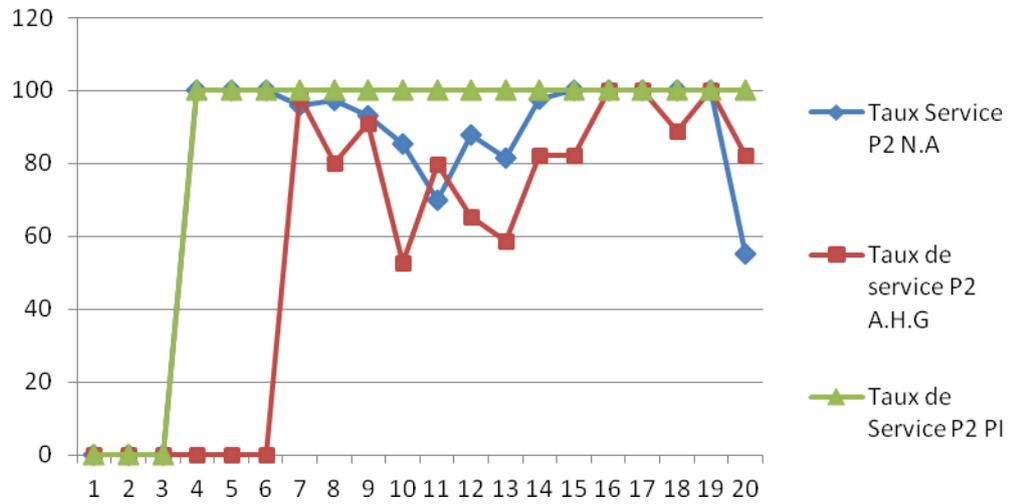


Figure III-20 Comparaison du taux de service par période de P2 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

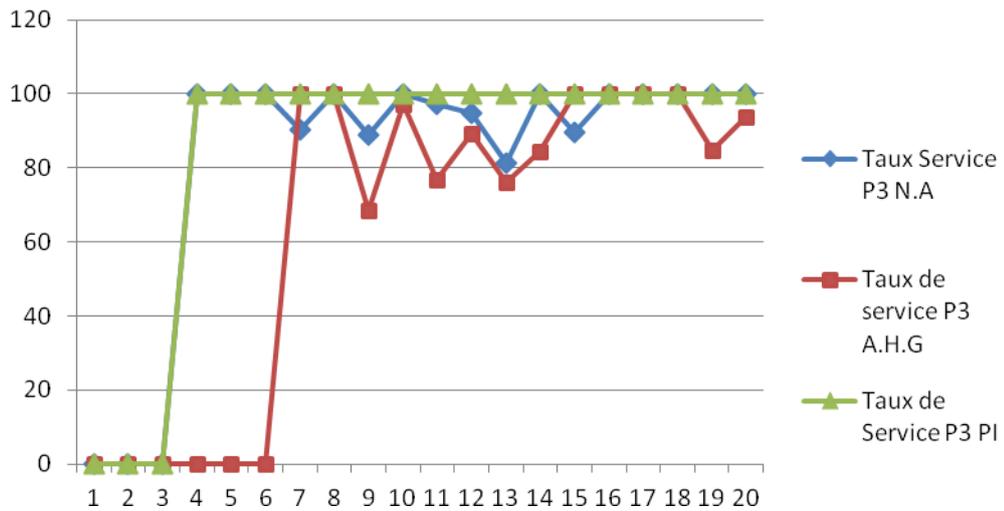


Figure III-21 Comparaison du taux de service par période de P3 selon notre approche (N.A) et l'approche à horizon gelé (A.H.G)

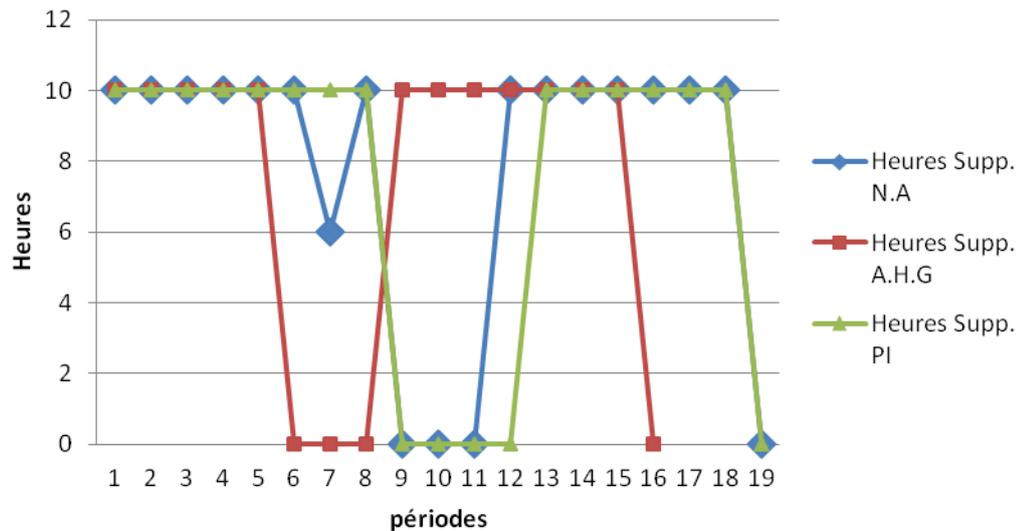


Figure III-22 Engagement d'heures supplémentaires selon les deux approches

Nous en déduisons que la modélisation fine des délais caractérisant le processus décisionnel était un facteur qui a permis d'augmenter la réactivité de notre approche face à une demande incertaine dans l'exemple traité. En effet, selon le contexte du problème étudié, une bonne exploitation de ces délais permet toujours d'aider le décideur à utiliser la et/ou les bonnes décisions qui offrent une plus grande capacité à atténuer l'effet de la fluctuation de la demande ou de n'importe quelle autre donnée dynamique. En plus, connaître finement les délais de chaque type de décision, donne la possibilité d'optimiser sa mise en œuvre. Ceci, se voit encore clairement dans la figure III-22 qui compare l'utilisation des heures supplémentaires selon les deux approches. Nous distinguons nettement des engagements d'utilisation d'heures supplémentaires décidés aux périodes 17 et 18 selon notre approche. Cependant, les engagements d'heures supplémentaires ne peuvent pas être décidés au-delà de la période 16 pour l'approche à horizon gelé. Ceci est causé par la différence entre les délais d'anticipation de la décision d'utilisation d'heures supplémentaires selon les deux approches. Ainsi, d'un point de vue structurel, notre approche nous donne la possibilité d'engager 30 heures supplémentaires de plus que l'approche à horizon gelé (périodes 17 et 18 et 19).

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons posé le cadre précis de notre étude en proposant une structure représentative du maillon générique d'une chaîne logistique. Cette structure est construite autour d'une entité centrale qui est le producteur, ayant des relations directes de type point à point avec ses fournisseurs de composants et de produits finis, son sous-traitant et ses clients. Nous avons défini les hypothèses de base qui régissent le fonctionnement du producteur et nous nous sommes intéressés à étudier le problème de la planification de ses activités en vue de satisfaire au mieux la demande de ses clients tout en optimisant les coûts.

Une analyse fine du processus décisionnel nous a permis de distinguer, pour chaque décision quel qu'en soit le type, deux phases différentes qui sont celle de l'anticipation de la décision et celle de la réalisation de la décision. Ces deux phases organisent la dynamique du producteur via les deux délais qu'elles imposent et leur incidence sur la planification des activités. Pour coller à la réalité de cette dynamique, nous avons adopté le principe que chaque décision puisse avoir ses propres délais d'anticipation et de réalisation. Nous avons montré comment, dans cette vision, on peut traduire la prise en compte de l'incertitude de la demande et des aléas de l'environnement et de la production de façon générale. C'est alors que nous avons proposé et détaillé le principe d'un processus dynamique de planification qui intègre les différentes hypothèses et caractéristiques décisionnelles. Ainsi, nous avons montré comment on peut parfaire la modélisation de la dynamique des activités de l'entité centrale constituée par le producteur et préparer, en même temps, une planification fine qui réagit au plus vite aux incertitudes et aléas.

Nous avons développé la modélisation mathématique complète du processus dynamique de planification et nous avons conçu son expérimentation par le biais d'un outil que nous avons implémenté, qui associe l'utilisation de la résolution numérique et de la simulation discrète.

Les simulations que nous avons effectuées nous ont permis, d'abord, de comparer les comportements des trois planifications obtenues tour à tour par l'application du plan idéal, par l'utilisation de notre approche en admettant l'incertitude de la demande et par la mise en œuvre, dans les mêmes conditions, de l'approche à horizon gelé. Il s'est confirmé de façon nette que, d'une part, l'avance dans la connaissance de la demande réelle permet d'atteindre le meilleur taux de service et que, d'autre part, tout retard dans la réaction à l'incertitude et aux aléas, dû au mécanisme du gel des décisions, conduit à amoindrir les performances aussi bien sur le taux de service que sur les coûts. D'où les avantages apportés par notre approche, consistant à réduire les gels et à favoriser une réactivité aussi rapide que possible.

Au-delà de ces constats globaux, il serait intéressant d'étudier plus finement, par un ensemble de séries de simulations, l'impact des variations de chacun des différents paramètres (coûts, délais, horizon ferme, horizon gelé, périodicité de planification) sur le rendement de la planification.

Enfin, et pour favoriser une réactivité plus efficace du processus dynamique de planification détaillée, nous étudions, dans le chapitre qui suit, la possibilité de guider ce processus par une planification agrégée.

## ***Chapitre IV***

# **Mise en œuvre de la structure décisionnelle hiérarchisée**

## **Introduction**

Afin d'assurer une planification robuste et réactive, nous avons proposé, à la fin du deuxième chapitre, une approche qui se base sur une structure décisionnelle à deux niveaux hiérarchiques : un niveau supérieur (ou agrégé) et un niveau inférieur (ou détaillé). Notre idée de base est de réaliser une planification détaillée au niveau inférieur qui soit guidée par le niveau supérieur à travers un plan de guidage. Nous avons consacré le chapitre précédent à la présentation et à la formalisation du problème de planification considéré au niveau inférieur. Cette formalisation se veut être suffisamment détaillée pour intégrer toutes sortes de contraintes de guidage.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur le niveau supérieur et sur son couplage avec le niveau inférieur. Il s'agit ici de présenter les différents aspects de la formalisation permettant de mettre en œuvre l'ensemble de la structure décisionnelle.

Ce chapitre se compose de trois parties. Dans la première partie, nous présentons les caractéristiques du niveau décisionnel supérieur. Dans la deuxième partie nous développons la modélisation mathématique de ce niveau. Enfin, dans la troisième partie, nous étudions le couplage entre le niveau supérieur et le niveau inférieur. Nous détaillons notamment les différents types de guidage et montrons comment les contraintes de guidage peuvent être intégrées dans le modèle détaillé.

## **1 Le niveau supérieur de décision**

Dans cette partie, nous détaillons les caractéristiques du niveau décisionnel supérieur et les relations temporelles qui assurent son couplage avec le niveau inférieur.

### **1.1 Éléments caractéristiques du niveau supérieur de planification**

#### **1.1.1 Agrégation du temps**

Le niveau décisionnel supérieur se base sur une agrégation temporelle. Les décisions sont prises sur un horizon de planification constitué de  $TA$  macro-périodes (on dira aussi périodes agrégées), à un regroupement de  $k$  périodes élémentaires comme l'illustre la figure IV-1 suivante. Chaque macro-période  $t$  est identifiée par son numéro (allant de 1 à  $TA$ ).

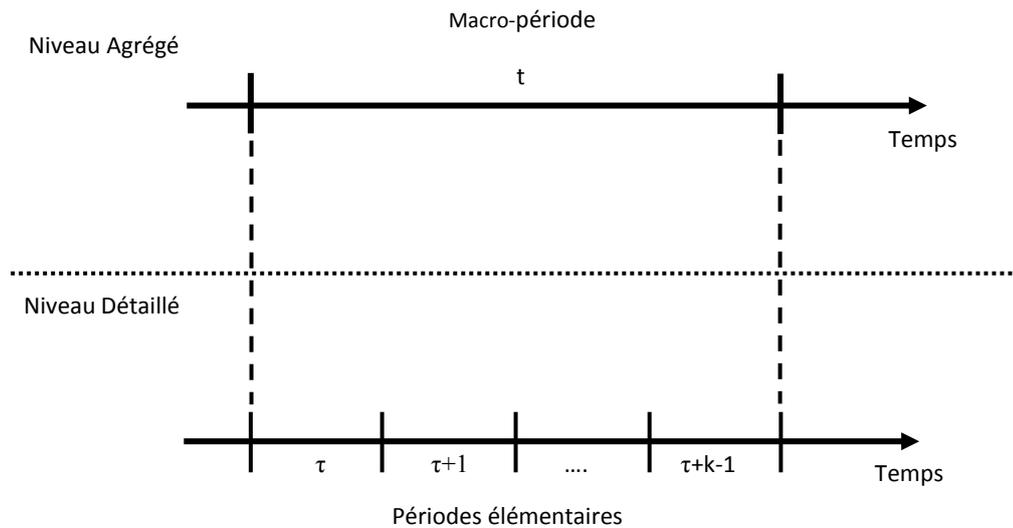


Figure IV-1 Regroupement de k périodes élémentaires en une macro-période

Compte tenu de cette agrégation temporelle, le niveau supérieur (que nous appelons aussi niveau agrégé) a une vision globale et condensée du système de production et des demandes clients. Ce niveau agrégé doit :

- gérer l'aspect prévisionnel de la planification en s'appuyant sur les informations disponibles et/ou sur des prévisions établies sur l'horizon de planification,
- élaborer un plan agrégé minimisant, sous les hypothèses considérées, les coûts engendrés par le processus de production,
- prendre en compte, sous une forme agrégée, la dynamique décisionnelle considérée au niveau détaillé,
- dégager selon la stratégie de guidage adoptée, les grandeurs issues de la planification agrégée à transmettre au niveau inférieur pour guider la planification détaillée dynamique. Ces grandeurs constituent le plan de guidage qui conditionne le degré d'autonomie accordé au niveau inférieur et assure la robustesse du niveau supérieur. Ces notions sont détaillées dans la suite.

Dans la conception que nous avons retenue, la planification au niveau supérieur est effectuée en une seule étape donnant directement un plan agrégé sur l'horizon complet.

Les décisions agrégées sont de même nature que celles établies par le niveau inférieur mais elles se rapportent à des macro-périodes. Ainsi, le niveau supérieur fixe pour chaque macro-période :

- le volume de production par produit,
- le volume d'approvisionnement de chaque composant,
- le volant d'heures supplémentaires à utiliser et/ou le volume de la sous-traitance pour chaque produit fini,
- Le volume d'achat direct de produits finis pour chaque produit.

Compte tenu du mécanisme d'agrégation choisi, il est nécessaire d'expliciter les relations entre les grandeurs temporelles considérées à chaque niveau pour pouvoir assurer une mise en œuvre correcte de la structure décisionnelle.

### 1.1.2 Relations temporelles entre niveau supérieur et niveau inférieur

Les relations temporelles entre niveau supérieur et niveau inférieur sont liées au facteur d'agrégation  $k$  qui précise le nombre de périodes élémentaires regroupées dans une macro-période. Nous adoptons les hypothèses de base suivantes :

- 1) l'horizon détaillé se compose de  $TD$  périodes détaillées, numérotées de 1 à  $TD$ ,
- 2) la longueur de l'horizon agrégé  $TA$  est calculée comme suit :  $TA = \left\lceil \frac{TD}{k} \right\rceil$ . Pour simplifier le traitement du couplage entre le niveau agrégé et le niveau détaillé,  $TD$  est toujours choisi comme un multiple de  $k$ ,
- 3) les macro-périodes de l'horizon agrégé sont numérotées de 1 à  $TA$ .

La figure IV-2 donne les correspondances de numérotation des périodes entre le niveau agrégé et le niveau détaillé.

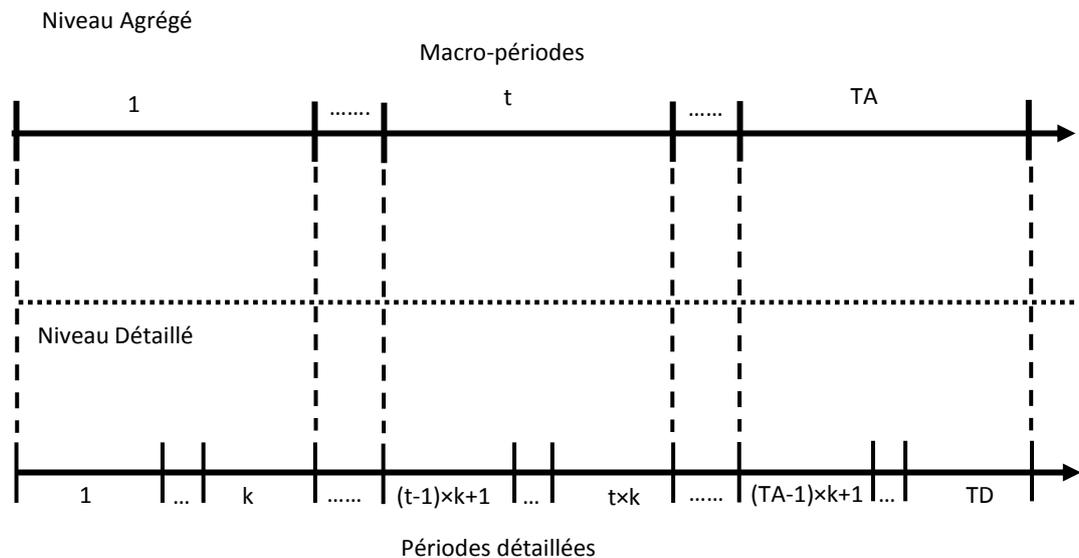


Figure IV-2 Correspondance entre macro-périodes et périodes détaillées

Nous retenons que :

- ⇒ Une macro-période «  $t$  » est composée des périodes détaillées appartenant à l'intervalle  $[(t-1) \times k + 1, t \times k]$
- ⇒ Une période détaillée  $\tau$  appartient à la macro-période  $\left\lceil \frac{\tau}{k} \right\rceil$

## 2 Modèle mathématique de décision du niveau agrégé

Dans cette section, nous détaillons la modélisation mathématique du processus de planification agrégée que doit assurer le niveau décisionnel supérieur. Cette modélisation doit être fidèle aux objectifs associés à ce niveau et qui ont été énumérés dans la section précédente. Nous commençons par préciser les données et les variables agrégées. Ensuite, nous formalisons les relations d'agrégation/désagrégation qui permettent de construire les données agrégées du modèle. Nous développons, alors, les équations qui décrivent le processus de planification agrégée ainsi que les contraintes imposées. Pour approfondir la procédure d'agrégation et accroître, ainsi, la robustesse du niveau supérieur, nous analysons l'impact des délais temporels considérés au niveau détaillé et nous montrons de quelle manière cet impact peut être pris en compte au niveau agrégé.

### 2.1 Modélisation mathématique du processus de la planification agrégée

Le modèle mathématique qui décrit le processus de planification agrégée est désigné MA. Ce modèle est écrit sous la forme d'un programme linéaire. Dans ce qui suit, nous détaillons les différents constituants de MA. Nous avons choisi de représenter les données et variables agrégées par des notations en majuscules pour les différencier des variables et données détaillées qui sont représentées par des notations en minuscules.

#### 2.1.1 Données détaillées et données agrégées

##### 2.1.1.1 Indices et dimensions

N	:	nombre de produits fabriqués
R	:	nombre de ressources existantes
J	:	nombre de composants utilisés dans la fabrication des produits
TA	:	nombre de périodes agrégées composant l'horizon agrégé
t, i, r, j	:	indices respectifs d'une période agrégée ( $t = 1..TA$ ), d'un produit ( $i=1..N$ ), d'une ressource ( $r=1..R$ ) et d'un composant ( $j=1..J$ ).

##### 2.1.1.2 Coefficients techniques

$\alpha_{ji}$	:	coefficient de composition indiquant le nombre de composants j entrant dans la fabrication du produit i.
$\omega_{ir}$	:	coefficient de consommation indiquant le nombre d'unités de la ressource r consommées pour la fabrication d'un produit i.

Ces coefficients sont identiques au niveau agrégé et au niveau détaillé.

### 2.1.1.3 Paramètres de production

$SP_{i,0}, SC_{j,0}$	:	stocks en produits $i$ et en composants $j$ disponibles au début de la 1 <sup>ère</sup> période agrégée
$D_{i,t}$	:	demande en produit $i$ à la période agrégée $t$
$CAP_{r,t}$	:	capacité de la ressource $r$ à la période agrégée $t$
$HM_{r,t}$	:	volume maximum d'heures supplémentaires autorisées sur la ressource $r$ à la période agrégée $t$ .

### 2.1.1.4 Coûts unitaires agrégés

$CSP_{i,t}$	:	coût unitaire de stockage du produit $i$ à la période agrégée $t$
$CSC_{j,t}$	:	coût unitaire de stockage du composant $j$ à la période agrégée $t$
$CAR_{i,t}$	:	coût d'un arriéré de production du produit $i$ à la période agrégée $t$
$CX_{i,t}$	:	coût unitaire de production en interne du produit $i$ à la période agrégée $t$
$CY_{i,t}$	:	coût unitaire de sous-traitance du produit $i$ à la période agrégée $t$
$CF_{i,t}$	:	coût unitaire d'achat direct du produit $i$ à la période agrégée $t$
$CH_{r,t}$	:	coût d'une heure supplémentaire allouée à la ressource $r$ à la période agrégée $t$
$CA_{j,t}$	:	coût unitaire d'achat du composant $j$ à la période agrégée $t$
$COST_t$	:	coût global relatif à une période agrégée $t$ .

### 2.1.2 Variables décisionnelles agrégées

Pour favoriser la cohérence entre les modèles, nous adoptons au niveau supérieur une formalisation du processus de décision analogue à celle utilisée au niveau détaillé. Trois variables agrégées sont associées à chaque type de décision et permettent de prendre en compte la différenciation des valeurs de la décision au cours de son exécution : à l'engagement, au début de la réalisation effective et à la fin de la réalisation. Les relations qui lient au niveau agrégé ces trois variables font l'objet d'une analyse spécifique qui est développée dans la section 2.2.

#### - Production interne agrégée

$BX_{i,t}, MX_{i,t}, QX_{i,t}$  : désignent, respectivement pour la production interne du produit  $i$ , la quantité engagée en  $t$ , la quantité mise en production en  $t$  et la quantité obtenue en  $t$ .

#### - Sous-traitance agrégée

- $BY_{i,t}, MY_{i,t}, QY_{i,t}$  : désignent, respectivement pour la sous-traitance du produit  $i$ , la quantité engagée en  $t$ , la quantité sous-traité en  $t$  et la quantité fournie en  $t$ .
- Achat de produits finis
- $BF_{i,t}, MF_{i,t}, QF_{i,t}$  : désignent, respectivement pour l'achat direct de produits  $i$ , la quantité d'achat engagée en  $t$ , la quantité d'achat confirmé en  $t$  et la quantité reçue en  $t$ .
- Achat de composants
- $BA_{j,t}, MA_{j,t}, QA_{j,t}$  : désignent, respectivement pour l'achat de composants  $j$ , la quantité d'achat engagée en  $t$ , la quantité d'achat confirmée en  $t$  et la quantité reçue en  $t$ .
- Heures supplémentaires
- $BH_{r,t}, MH_{r,t}, QH_{r,t}$  : désignent, respectivement pour les heures supplémentaires de la ressource  $r$ , le volant d'heures engagé en  $t$  pour cette ressource, le volant d'heures confirmées en  $t$  et le volant d'heures consommé effectivement en  $t$ .
- Stocks et arriérés de production
- $SP_{i,t}, SC_{j,t}$  : désignent le stock agrégé à la fin de  $t$ , respectivement pour le produit  $i$  et pour le composant  $j$
- $AR_{i,t}$  : Arriéré agrégé du produit  $i$  à la fin de  $t$ .

Ayant ainsi présenté les données et les variables agrégées, nous développons dans le paragraphe suivant les relations d'agrégation qui lient les données agrégées aux données détaillées.

### 2.1.3 Relations d'agrégation entre données

Ces relations détaillent la manière dont sont construites les données agrégées à partir des données détaillées. Les données à agréger sont les différents coûts unitaires, les capacités des ressources et les stocks initiaux.

#### 2.1.3.1 Construction des coûts agrégés

Nous avons choisi d'estimer le coût agrégé d'une décision sur une macro-période  $t$  pour la moyenne arithmétique des coûts unitaires relatifs aux périodes détaillées qui composent ladite macro-période.

$$CX_{i,t} = \frac{1}{k} \times \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} cx_{i,\tau}^1 \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TD \quad (13)$$

$$CY_{i,t} = \frac{1}{k} \times \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} cy_{i,\tau}^1 \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TD \quad (14)$$

$$CF_{i,t} = \frac{1}{k} \times \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} cf_{i,\tau}^1 \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TD \quad (15)$$

$$CH_{r,t} = \frac{1}{k} \times \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} ch_{r,\tau}^1 \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TD \quad (16)$$

Les coûts de stockage et d'arriéré sont estimés différemment. En effet, une unité en stock (ou en arriéré) en fin de  $t$  est considérée comme une unité qui a été stockée (ou qui a été manquante) tout au long des périodes détaillées qui composent cette période agrégée. On a alors :

$$CSP_{i,t} = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} csp_{i,\tau}^1 \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (17)$$

$$CSC_{j,t} = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} csc_{j,\tau}^1 \quad \forall j=1..J \quad \forall t \in TA \quad (18)$$

$$CAR_{i,t} = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} car_{i,\tau}^1 \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (19)$$

### 2.1.3.2 Capacités et stocks initiaux agrégés

Les capacités agrégées des différentes ressources sont obtenues par la somme des capacités détaillées relatives à la période agrégée considérée ; il en est de même pour le volume maximum d'heures supplémentaires autorisées sur la ressource. Les stocks initiaux agrégés sont identiques aux stocks initiaux détaillés.

$$CAP_{r,t} = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} cap_{r,\tau}^1 \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (20)$$

$$HM_{r,t} = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} hm_{r,\tau}^1 \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (21)$$

$$SP_{i,0} = sp_{i,0}^1 \quad \forall i=1..N \quad (22)$$

$$SC_{j,0} = sc_{j,0}^1 \quad \forall j=1..J \quad (23)$$

### 2.1.4 Contraintes

Les contraintes ci-après sont imposées au processus de planification agrégée pour ce qui concerne l' :

- évolution du stock agrégé et les limites de capacité

$$SP_{i,t} - AR_{i,t} = SP_{i,t-1} - AR_{i,t-1} + \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (24)$$

$$QX_{i,t} + QY_{i,t} + QF_{i,t} - D_{i,t}$$

$$SC_{j,t} = SC_{j,t-1} - \sum_{i=1}^N a_{j,i} (MX_{i,t} + MY_{i,t}) + QA_{j,t} \quad \forall j=1..J \quad \forall t \in TA \quad (25)$$

Les contraintes (24) et (25) formalisent respectivement la conservation des stocks agrégés de produits finis et de composants sur l'horizon de planification agrégé.

$$\sum_{i=1}^N \omega_{i,r} MX_{i,t} \leq CAP_{r,t} + MH_{r,t} \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (26)$$

La contrainte (26) assure que, sur chaque période agrégée, la charge liée à la production est compatible avec la capacité des ressources concernées augmentée des heures supplémentaires qui lui sont affectées.

$$MH_{r,t} \leq HM_{r,t} \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (27)$$

La contrainte (27) garantit le respect du volume agrégé maximal des heures supplémentaires affectées à une ressource.

### 2.1.5 La fonction objectif

La fonction objectif minimise le coût total sur l'horizon de planification agrégée. Son expression s'appuie sur la formule du calcul du coût total correspondant à une macro-période. Pour la cohérence avec le niveau détaillé, ce coût total est calculé sur la base des décisions engagées.

- Coût total dans une période agrégée

$$COST_t = \sum_{i=1}^N \left( CSP_{i,t} \times SP_{i,t} + CAR_{i,t} \times AR_{i,t} + CX_{i,t} \times BX_{i,t} \right) + \quad \forall t \in TA \quad (28)$$

$$+ CY_{i,t} \times BY_{i,t} + CF_{i,t} \times BF_{i,t}$$

$$\sum_{j=1}^J \left( CSC_{j,t} \times SC_{j,t} + CA_{j,t} \times BA_{j,t} \right) + \sum_{r=1}^R \left( CH_{r,t} \times BH_{r,t} \right)$$

- La fonction objectif minimise la somme des coûts sur l'horizon de planification agrégée.

$$\min \sum_{t=1}^{TA} COST_t \quad (29)$$

## 2.2 Modélisation des interactions entre décisions agrégées

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié, avec une vision détaillée, l'inertie et la variabilité liée aux aléas caractéristiques de la problématique de la prise de décision dans le contexte industriel. Cette étude a permis de mettre en évidence la phase d'anticipation et la phase de réalisation qui sont caractérisées par des délais spécifiques à chaque type de décision. Dans un contexte non perturbé, les relations entre ces variables traduisent simplement un décalage temporel.

Nous avons repris ce même formalisme pour les décisions agrégées. Les délais d'anticipation et de réalisation qui s'expriment en périodes élémentaires ne peuvent plus être pris en compte tels quels au niveau agrégé. En effet, celui-ci ignore ce qui se passe au sein d'une macro-période. L'objet de ce paragraphe est de montrer comment ces délais et les mécanismes de la prise de décision détaillée peuvent être intégrés sous une forme agrégée dans le modèle du niveau supérieur.

### 2.2.1 Relations entre décisions détaillées et décisions agrégées

Dans une structure hiérarchique à deux niveaux de décision, le niveau agrégé établit un cadre décisionnel qui sera suivi par le niveau détaillé. Dans ce contexte, les décisions agrégées transmises par le niveau supérieur au niveau inférieur doivent être respectées au mieux par ce dernier. Nous pouvons concevoir, compte tenu du mécanisme d'agrégation temporel mis en œuvre au niveau supérieur, que la somme des décisions détaillées sur l'ensemble des périodes relatives à une macro-période  $t$  doit être égale à la décision agrégée associée à  $t$ . Ce type d'égalité est classiquement pris en compte dans les approches hiérarchisées. La figure IV-4 illustre une telle relation en se basant sur l'engagement d'une décision générique « e ».

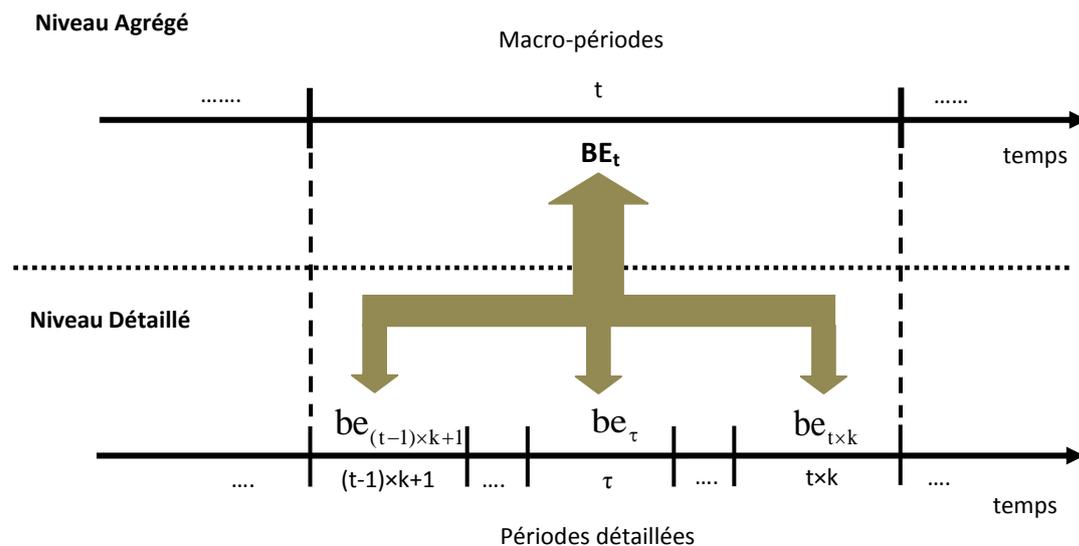


Figure IV-3 Relation entre décisions détaillées et décision agrégée dans le cas idéal

Ainsi, pour toute décision générique « e », nous pouvons établir les relations élémentaires suivantes entre décisions détaillées et la décision agrégée associée.

$$BE_t = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} be_\tau \quad \forall e \in \{x_i, y_i, f_i, a_j, h_r \mid i=1..N, j=1..J, r=1..R\} \quad \forall t \in TA \quad (r1)$$

$$ME_t = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} me_\tau \quad \forall e \in \{x_i, y_i, f_i, a_j, h_r \mid i=1..N, j=1..J, r=1..R\} \quad \forall t \in TA \quad (r2)$$

$$QE_t = \sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} qe_\tau \quad \forall e \in \{x_i, y_i, f_i, a_j, h_r \mid i=1..N, j=1..J, r=1..R\} \quad \forall t \in TA \quad (r3)$$

Ces relations élémentaires vont nous permettre d'exprimer la prise en compte, au niveau du processus décisionnel agrégé, de l'impact de l'inertie décisionnelle établie au niveau détaillé.

### 2.2.2 Conditions élémentaires entre décisions agrégées

Les équations (2) et (3), établies au troisième chapitre, mettent en évidence les relations entre les trois variables détaillées qui représentent les deux phases du processus décisionnel associé à toute décision dans un contexte sans perturbations ni incertitudes.

De manière analogue, nous devons établir, ici, les relations entre les variables agrégées associées à l'engagement, au début de la réalisation et à la fin de la réalisation.

Une voie simpliste aurait consisté à faire une abstraction, au niveau supérieur, du processus décisionnel considéré au niveau détaillé et, donc, à négliger complètement les délais d'anticipation et de réalisation associés aux décisions. Les relations entre les trois variables agrégées décrivant une même décision agrégée générique « E » s'écriraient alors comme suit :

$$BE_t = ME_t \quad \forall E \in \{X_i, Y_i, F_i, A_j, H_r \mid i=1..N, j=1..J, r=1..R\} \quad \forall t \in TA \quad (r4)$$

$$ME_t = QE_t \quad \forall E \in \{X_i, Y_i, F_i, A_j, H_r \mid i=1..N, j=1..J, r=1..R\} \quad \forall t \in TA \quad (r5)$$

Cependant, avec de telles relations élémentaires nous obtenons un modèle agrégé classique MAC qui ne prend pas en compte les mécanismes décisionnels détaillés. Les décisions qui en sont issues ne sont pas forcément représentatives de la réalité et risquent de ne pas être robustes.

Afin d'approcher un modèle agrégé qui tient mieux compte des modalités de la prise de décision au niveau détaillé, nous proposons l'analyse et la démarche exposées dans le paragraphe suivant.

### 2.2.3 Analyse de l'influence des délais temporels détaillés pour sa prise en compte au niveau agrégé

Pour mettre en évidence le fil directeur de notre démarche, nous proposons d'étudier un exemple simple illustré par la figure IV-5.

Dans cet exemple, nous considérons un horizon détaillé de 8 périodes numérotées de 1 à 8. Le facteur d'agrégation temporelle est pris égal à 4, ce qui nous donne un horizon agrégé composé de 2 macro-périodes.

La figure IV-5 illustre précisément l'évolution, au niveau détaillé, d'une décision générique « e » dont le délai d'anticipation est de 1 période détaillée et le délai de réalisation est de 2 périodes détaillées ; la prise de décision est supposée s'effectuer sans perturbations ni incertitudes. Ainsi, les variables d'engagement, de mise en œuvre et de fin sont égales et sont seulement décalées temporellement. Ceci est représenté dans la figure par des flèches qui lient, d'une part, les variables d'engagement aux variables de réalisation correspondantes et, d'autre part, les variables de réalisation aux variables de réception correspondantes.

Les flèches en gras montrent la correspondance entre des variables (engagement ou réalisation) dont l'origine appartient à la première macro-période et la destination fait partie de la deuxième macro-période.

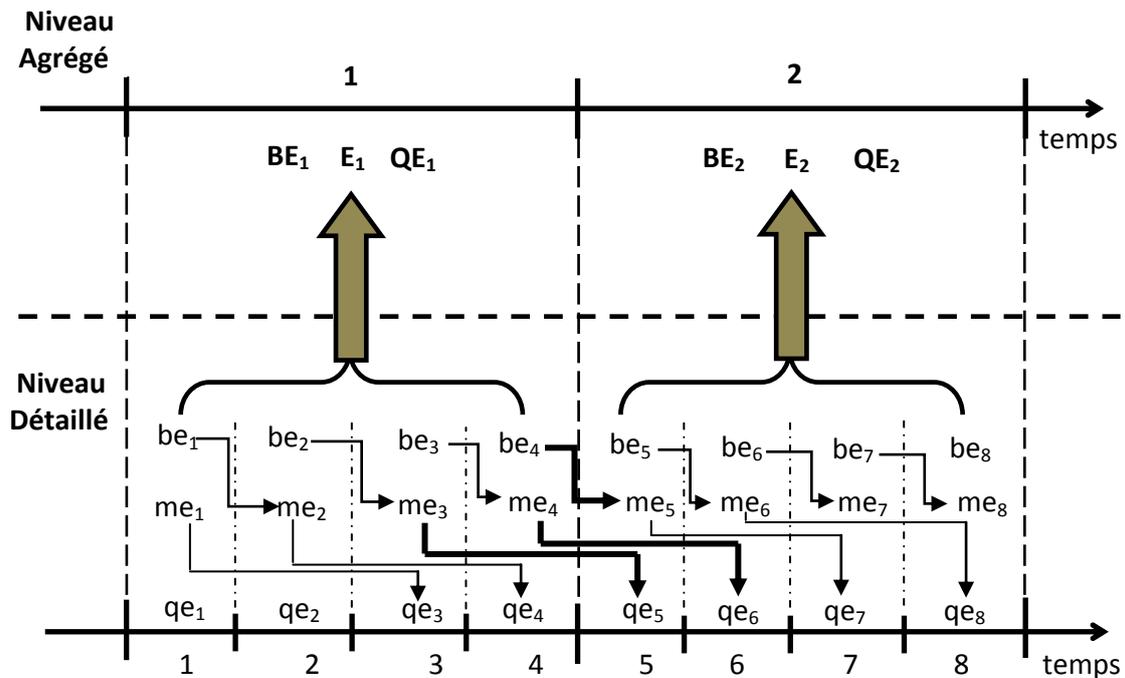


Figure IV-4 Imputation des décisions détaillées dans les décisions agrégées

Selon les relations r1, r2 et r3 (§2.2.1), nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$BE_1 = be_1 + be_2 + be_3 + be_4 \quad (a)$$

$$BE_2 = be_5 + be_6 + be_7 + be_8 \quad (b)$$

$$ME_1 = me_1 + me_2 + me_3 + me_4 \quad (c)$$

$$ME_2 = me_5 + me_6 + me_7 + me_8 \quad (d)$$

$$QE_1 = qe_1 + qe_2 + qe_3 + qe_4 \quad (e)$$

$$QE_2 = qe_5 + qe_6 + qe_7 + qe_8 \quad (f)$$

Le respect des délais d'anticipation et de réalisation nous impose les égalités suivantes entre variables détaillées :

$$be_\tau = me_{\tau+1} \quad \forall \tau=1..7 \quad (g)$$

$$me_\tau = qe_{\tau+2} \quad \forall \tau=1..6 \quad (h)$$

En partant de la relation (d) et en utilisant les relations (a), (b) et (g), nous obtenons :

$$\begin{aligned} ME_2 &= me_5 + me_6 + me_7 + me_8 \\ &= be_4 + be_5 + be_6 + be_7 \quad (i) \\ &= \frac{be_4}{BE_1} \cdot BE_1 + \frac{be_5 + be_6 + be_7}{BE_2} \end{aligned}$$

Pour exprimer cette relation en termes agrégés uniquement, nous faisons l'hypothèse que le volume engagé dans une macro-période « t » est équi-réparti sur toutes les périodes élémentaires qui la composent. Ainsi, pour notre exemple nous avons :

$$be_1 + be_2 + be_3 + be_4 = \frac{BE_1}{4}$$

En généralisant, nous établissons pour n'importe quelle période élémentaire  $\tau$  appartenant à une macro-période t :

$$be_\tau = \frac{BE_t}{k} \quad (j)$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} ME_2 &= \frac{1}{k} \cdot BE_1 + \frac{3}{k} \cdot BE_2 \\ &= \frac{lb_e}{k} \cdot BE_1 + \frac{k - lb_e}{k} \cdot BE_2 \quad (r6) \end{aligned}$$

La relation (r4) montre que, pour une décision donnée E, la quantité mise en œuvre pendant la macro-période 2 correspond à une « combinaison pondérée » des quantités engagées dans la macro-période 1 et la macro-période 2. Les coefficients de pondération sont liés au rapport entre le délai d'anticipation de la décision concernée et le facteur d'agrégation k.

La relation (r4) qui peut être généralisée pour n'importe quelle macro-période « t » de l'horizon agrégé TA correspond à une vision agrégée du processus de décision détaillé.

$$ME_t = \frac{lb_e}{k} \cdot BE_{t-1} + \frac{k - lb_e}{k} \cdot BE_t \quad \forall t \in TA \quad (r'6)$$

Cette formulation est intéressante car elle fait explicitement apparaître au niveau agrégé un « en-cours » entre deux périodes agrégées consécutives. Cet en-cours agrégé est directement relié aux délais d'anticipation. Cette approche peut être vue comme une procédure permettant d'évaluer un en-cours au niveau agrégé, ce qui constitue une originalité du modèle agrégé.

Avec un raisonnement analogue, nous établissons des relations d'en-cours entre la mise en œuvre d'une décision et la fin de sa réalisation au niveau agrégé. Ainsi, sur le même exemple (figure IV-5), en partant de la relation (f) et en utilisant les relations (c) et (h), nous aboutissons au développement suivant :

$$\begin{aligned} QE_2 &= qe_5 + qe_6 + qe_7 + qe_8 \\ &= me_3 + me_4 + me_5 + me_6 \\ &= \frac{me_3 + me_4}{ME_1} \cdot ME_1 + \frac{me_6 + me_6}{ME_2} \cdot ME_2 \end{aligned}$$

En considérant l'hypothèse de l'équirépartition sur toutes les périodes élémentaires composant la macro-période, nous obtenons :

$$\begin{aligned} QE_2 &= \frac{2}{4} \cdot ME_1 + \frac{2}{4} \cdot ME_2 \\ &= \frac{lm_e}{k} \cdot ME_1 + \frac{k - lm_e}{k} \cdot ME_2 \end{aligned} \quad (r7)$$

La relation (r7) montre que pour une décision donnée E, la quantité obtenue pendant la macro-période 2 correspond à une « combinaison pondérée » des quantités mises en œuvre dans la macro-période 1 et dans la macro-période 2. Les coefficients de pondération sont liés au rapport entre le délai de réalisation de la décision concernée et le facteur d'agrégation k.

Comme pour (r6), cette relation peut être généralisée pour toute macro-période t de l'horizon agrégé TA :

$$QE_t = \frac{lm_e}{k} \cdot ME_{t-1} + \frac{k - lm_e}{k} \cdot ME_t \quad \forall t \in TA \quad (r'7)$$

Les relations (r'6) et (r'7) formalisent, ainsi, les relations entre les variables agrégées d'engagement, de réalisation et de réception au niveau supérieur. Elles sont basées sur les délais d'anticipation et de réalisation appliqués de façon précise à la décision considérée au niveau détaillé.

Nous remarquons que lorsque le facteur d'agrégation est grand relativement à délais lb et lm petits, les ratios lb/k et lm/k tendent vers 0 et les relations (r'6) et (r'7) tendent vers les conditions élémentaires classiques (r4) et (r5).

### 2.2.4 Contraintes de prise en compte de l'effet des délais temporels au niveau agrégé

Les relations (r'6) et (r'57) sont intégrées sous forme de contraintes dans le modèle du niveau supérieur conduisant au modèle agrégé MA.

- Prise en compte des délais d'anticipation au niveau agrégé :

$$MX_{i,t} = \frac{lb_{x_i}}{k} BX_{i,t-1} + \frac{k - lb_{x_i}}{k} BX_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (30)$$

$$MY_{i,t} = \frac{lb_{y_i}}{k} BY_{i,t-1} + \frac{k - lb_{y_i}}{k} BY_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (31)$$

$$MF_{i,t} = \frac{lb_{f_i}}{k} BF_{i,t-1} + \frac{k - lb_{f_i}}{k} BF_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (32)$$

$$MH_{r,t} = \frac{lb_{h_r}}{k} BH_{r,t-1} + \frac{k - lb_{h_r}}{k} BH_{r,t} \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (33)$$

$$MA_{j,t} = \frac{lb_{a_j}}{k} BA_{j,t-1} + \frac{k - lb_{a_j}}{k} BA_{j,t} \quad \forall j=1..J \quad \forall t \in TA \quad (34)$$

- Prise en compte des délais de réalisation au niveau agrégé

$$QX_{i,t} = \frac{lm_{x_i}}{k} MX_{i,t-1} + \frac{k - lm_{x_i}}{k} MX_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (35)$$

$$QY_{i,t} = \frac{lm_{y_i}}{k} MY_{i,t-1} + \frac{k - lm_{y_i}}{k} MY_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (36)$$

$$QF_{i,t} = \frac{lm_{f_i}}{k} MF_{i,t-1} + \frac{k - lm_{f_i}}{k} MF_{i,t} \quad \forall i=1..N \quad \forall t \in TA \quad (37)$$

$$QH_{r,t} = \frac{lm_{h_r}}{k} MH_{r,t-1} + \frac{k - lm_{h_r}}{k} MH_{r,t} \quad \forall r=1..R \quad \forall t \in TA \quad (38)$$

$$QA_{j,t} = \frac{lm_{a_j}}{k} MA_{j,t-1} + \frac{k - lm_{a_j}}{k} MA_{j,t} \quad \forall j=1..J \quad \forall t \in TA \quad (39)$$

L'intégration de ces contraintes dans la modélisation agrégée permet de prendre explicitement en compte les délais d'anticipation et de réalisation imposés par le comportement décisionnel détaillé. Cela contribue à améliorer le suivi des décisions agrégées par le niveau inférieur et favorise par là même la robustesse des décisions agrégées.

### 3 Le plan de guidage

Dans notre travail, nous cherchons à assurer une planification robuste et réactive par rapport aux incertitudes et aux perturbations. Nous proposons à cette fin de coordonner la planification agrégée et la planification détaillée dans la structure à deux niveaux de décision. La coordination entre ces niveaux est effectuée à l'aide d'un «Plan de Guidage (PG)». La planification agrégée génère un plan de production qui précise sur les macro-périodes les volumes globaux de production interne ou sous-traitée, les ajustements de capacités ainsi que les niveaux de stocks pour satisfaire, à moindre coût, les prévisions de demandes connues sur l'horizon considéré. Un plan de guidage peut être défini à l'issue de cette étape : il contient les informations que l'on choisit de transmettre au niveau détaillé et qui sont interprétées par celui-ci comme des contraintes à respecter ou des objectifs à atteindre. Selon la portée temporelle et la nature des informations contenues dans le plan de guidage, nous accordons une autonomie plus ou moins grande au niveau détaillé. De cette autonomie dépend le degré de réactivité de la planification détaillée.

Parmi les informations possibles qui peuvent constituer un plan de guidage nous citons :

- le volume de production agrégée pour chaque période agrégée :  $PG = \{X_{it} \mid i=1..N, t=1..TA\}$ ,
- le niveau du stock et d'arriérés de produits finis à la fin de chaque période agrégée :  $PG = \{SP_{it}, AR_{it} \mid i=1..N, t=1..TA\}$ ,
- la capacité agrégée utilisée pendant chaque période agrégée :  $PG = \{\sum_i \omega_{ir} X_{it} \mid r=1..R, t=1..TA\}$ ,
- le coût agrégé pour chaque période agrégée :  $PG = \{COST_t \mid t=1..TA\}$ ,
- les ajustements de capacités (heures supplémentaires agrégées, sous-traitance agrégée, etc.).

Le plan de guidage peut aussi être une combinaison de plusieurs de ces informations, par exemple, les volumes de production et les capacités agrégées.

Dans notre travail, nous avons choisi de nous intéresser à deux catégories de plan de guidage. La première catégorie se fonde sur un guidage budgétaire ; nous avons étudié, dans cette catégorie, deux types de guidage. La deuxième catégorie se base sur un guidage d'ajustement de capacité ; nous avons étudié, dans cette catégorie, un troisième type de guidage. Ces deux catégories de guidages sont développées dans ce qui suit.

#### 3.1 Guidage budgétaire

##### 3.1.1 Caractéristiques du guidage budgétaire

Le guidage budgétaire est un guidage qui s'appuie sur les coûts du plan agrégé. Les coûts agrégés de chaque macro-période sont transmis au niveau détaillé comme des contraintes budgétaires à ne pas dépasser lors du processus dynamique de planification

détaillée. La contrainte imposée au niveau détaillé est « globale » puisqu'elle concerne le coût associé à l'ensemble des décisions détaillées relevant d'une macro-période sans distinguer un type de décision en particulier. Le niveau détaillé établit ses décisions en ayant toute la liberté de manœuvre à condition de ne pas dépasser le budget global transmis pour chaque macro-période. Ceci marque une forme d'autonomie associée à cette catégorie de guidage.

On peut envisager différentes possibilités de choix des éléments de coûts pour constituer le plan de guidage. Rappelons la formule du calcul du coût total agrégé pour chaque macro-période (équation 28, §2.1.5) :

$$\begin{aligned} \text{COST}_t = & \sum_{i=1}^N \left( \text{CSP}_{i,t} \times \text{SP}_{i,t} + \text{CAR}_{i,t} \times \text{AR}_{i,t} + \text{CX}_{i,t} \times \text{BX}_{i,t} \right) + \\ & + \text{CY}_{i,t} \times \text{BY}_{i,t} + \text{CF}_{i,t} \times \text{BF}_{i,t} \quad \forall t \in \text{TA} \\ & + \sum_{j=1}^J \left( \text{CSC}_{j,t} \times \text{SC}_{j,t} + \text{CA}_{j,t} \times \text{BA}_{j,t} \right) + \sum_{r=1}^R \left( \text{CH}_{r,t} \times \text{BH}_{r,t} \right) \end{aligned}$$

Ce coût est composé des trois sous-coûts suivants :

$$\text{COST}_t = \text{CO1}_t + \text{CO2}_t + \text{CO3}_t \quad \text{avec} \quad \forall t \in \text{TA}$$

$$\begin{aligned} \text{CO1}_t = & \sum_{i=1}^N \left( \text{CX}_{i,t} \times \text{BX}_{i,t} + \text{CY}_{i,t} \times \text{BY}_{i,t} + \text{CF}_{i,t} \times \text{BF}_{i,t} \right) + \\ & + \sum_{j=1}^J \left( \text{CSC}_{j,t} \times \text{SC}_{j,t} + \text{CA}_{j,t} \times \text{BA}_{j,t} \right) + \sum_{r=1}^R \left( \text{CH}_{r,t} \times \text{BH}_{r,t} \right) \quad \forall t \in \text{TA} \end{aligned}$$

$$\text{CO2}_t = \sum_{i=1}^N \text{CSP}_{i,t} \times \text{SP}_{i,t} \quad \forall t \in \text{TA}$$

$$\text{CO3}_t = \sum_{i=1}^N \text{CAR}_{i,t} \times \text{AR}_{i,t} \quad \forall t \in \text{TA}$$

Ces trois coûts représentent, respectivement dans l'ordre de leur écriture, le coût de production (production interne ou sous-traitée, heures supplémentaires, approvisionnement en composants), le coût de stockage des produits finis et le coût des arriérés de production pour chaque macro-période.

Le choix des coûts à inclure dans le plan de guidage est important. il faut opérer avec prudence pour optimiser la pertinence du choix tout en évitant qu'il soit négativement contraignant ; la faisabilité même du processus de planification dynamique peut en dépendre.

Dans le cas d'un guidage budgétaire à base du coût total agrégé de chaque macro-période, le risque d'infaisabilité est grand. Ce risque est essentiellement lié à la présence d'arriérés détaillés. En effet, si le profil de la demande détaillée est défavorable (demande élevée en début de la macro-période, par exemple), le niveau détaillé n'est pas en mesure de satisfaire la demande et est donc obligé de générer des arriérés temporaires dont le coût

est élevé. Ceci peut conduire à un coût détaillé total très élevé qui ne sera pas compatible avec le coût transmis par le guidage puisque le niveau supérieur ne peut prévoir ces arriérés détaillés.

Pour cette raison, nous adoptons un guidage qui ne prend pas en compte le coût des arriérés agrégés et ne contraint donc pas les arriérés détaillés, supprimant ainsi les risques d'infaisabilité. Nous appelons « **coût effectif de production** » d'une macro-période « t » la somme des coûts  $CO1_t$  et  $CO2_t$ . Ce coût intègre le coût de production et le coût de stockage.

Le premier guidage budgétaire que nous concevons PG1 est précisément un guidage par « coût effectif de production ». Il est intuitivement facile de vérifier que, pour n'importe quel profil de la demande détaillée, le niveau inférieur pourra toujours fournir un plan détaillé qui respecte ce coût agrégé. Ce premier plan de guidage budgétaire est donné par l'expression suivante :

$PG1 = \{CG_t = CO1_t + CO2_t \ \forall t=1..TA\}$  dans lequel  $CG_t$  désigne le coût de guidage pour la macro-période « t ».

De manière analogue, il peut se trouver des cas où la contrainte sur les coûts de stockage peut brider fortement le niveau détaillé. Il n'y a pas de risque d'infaisabilité mais cela peut réduire la qualité de service. Aussi, nous proposons un deuxième type de guidage budgétaire PG2 qui se limite uniquement au « **coût de production** ». Les coûts liés au stockage ne sont pas pris en compte dans ce guidage. Nous pouvons écrire alors la formule suivante du deuxième plan de guidage :

$$PG2 = \{CG_t = CO1_t \ \forall t=1..TA\}$$

Ayant ainsi défini les deux types de guidage budgétaire, nous montrons dans le paragraphe suivant comment intégrer, au niveau détaillé, les contraintes assurant le respect de ces guidages.

### 3.1.2 Intégration des contraintes du guidage budgétaire au niveau détaillé

Pour introduire les contraintes assurant le suivi du budget agrégé dans le processus dynamique de la planification détaillée nous commençons par reformuler l'écriture du coût total détaillé de façon cohérente avec l'écriture que nous venons de donner pour le coût total agrégé.

$$\text{cost}_\tau^s = \text{col}_\tau^s + \text{co2}_\tau^s + \text{co3}_\tau^s \quad \text{avec} \quad \forall \tau \in \text{HP}^s$$

$$\begin{aligned} \text{col}_\tau^s = & \sum_{i=1}^N (cx_{i,\tau}^s \times bx_{i,\tau}^s + cy_{i,\tau}^s \times by_{i,\tau}^s + cf_{i,\tau}^s \times bf_{i,\tau}^s) + \\ & \sum_{j=1}^J (csc_{j,\tau}^s \times sc_{j,\tau}^s + ca_{j,\tau}^s \times ba_{j,\tau}^s) + \sum_{r=1}^R (ch_{r,\tau}^s \times bh_{r,\tau}^s) \end{aligned} \quad \forall \tau \in \text{HP}^s$$

$$co2_{\tau}^s = \sum_{i=1}^N csp_{i,\tau}^s \times sp_{i,\tau}^s \quad \forall \tau \in HP^s$$

$$co3_{\tau}^s = \sum_{i=1}^N car_{i,\tau}^s \times ar_{i,\tau}^s \quad \forall \tau \in HP^s$$

Les trois coûts détaillés qui forment le coût total désignent, respectivement, le coût de production (détaillé), le coût des stocks (détaillé) et le coût des arriérés (détaillé) relatifs à une période élémentaire  $\tau$ , pour une étape de planification « s ».

Notons par  $cg_{\tau}^s$  le coût détaillé de suivi de guidage pour  $\tau \in HP^s$ . Selon le type du guidage, ce coût sera calculé de la façon suivante :

- Guidage par coût effectif de production (PG1)

$$cg_{\tau}^s = col_{\tau}^s + co2_{\tau}^s \quad \forall \tau \in HP^s$$

- Guidage par coût de production (PG2)

$$cg_{\tau}^s = col_{\tau}^s \quad \forall \tau \in HP^s$$

Comme le processus de planification détaillée est dynamique, le respect du budget de guidage doit être observé dynamiquement à chaque étape de la planification et s'appuyer alors sur une prise en compte du coût réel de suivi obtenu pour les périodes antérieures à  $\theta^s$ . Notons par  $\overline{cg}_{\tau}^s$  le coût détaillé réel de suivi obtenu pour  $\tau \in HP^s$ .

La figure IV-6 détaille l'aspect dynamique du suivi du budget agrégé de guidage au niveau de la planification détaillée. Dans cette illustration, nous présentons deux étapes de planification successives au cours desquelles l'évolution du suivi du coût agrégé de guidage prend en compte les coûts réels détaillés déjà obtenus.

Nous écrivons alors les contraintes assurant le suivi du guidage budgétaire. Ces contraintes sont incluses dans le modèle mathématique de la planification détaillé  $M^s$ .

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{\theta^s-1} \overline{cg}_{\tau}^s + \sum_{\tau=\theta^s}^{t \times k} cg_{\tau}^s \leq CG_t \quad t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil \quad \forall \theta^s \text{ dans TD} \quad (40)$$

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{t \times k} \overline{cg}_{\tau}^s \leq CG_t \quad t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil + 1..TA \quad \forall \theta^s \text{ dans TD} \quad (41)$$

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k+1}^{\theta^s-1} \overline{cg}_{\tau}^s \leq CG_t \quad \forall t = 1.. \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil - 1 \quad \forall \theta^s \text{ dans TD} \quad (42)$$

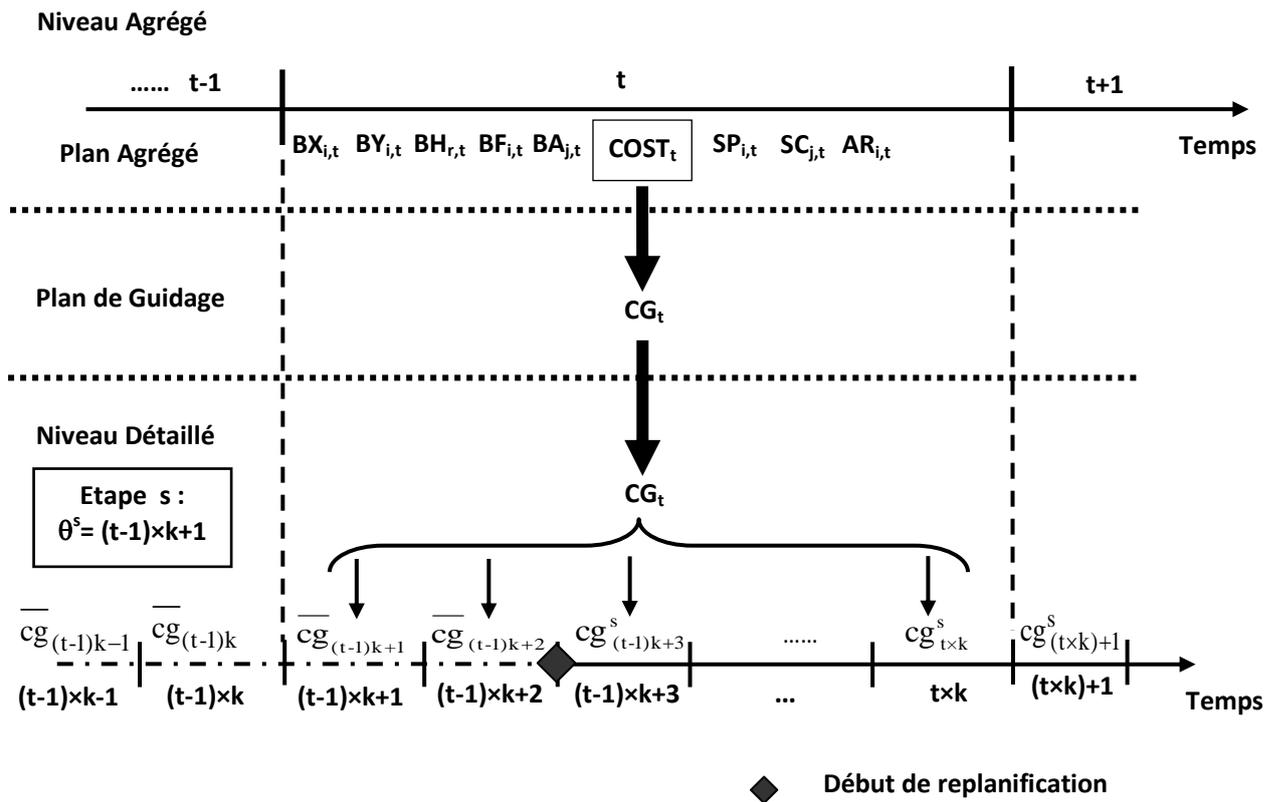


Figure IV-5 Suivi dynamique détaillé du budget agrégé de guidage

## 3.2 Le guidage par la sous-traitance agrégée

### 3.2.1 Caractéristiques du guidage par la sous-traitance agrégée

Ce guidage est basé sur la sous-traitance agrégée, par produit et par macro-période. Ses données sont extraites du plan de production agrégé qui est généré par le niveau supérieur et transmises au niveau inférieur comme des contraintes à respecter. Le plan de guidage construit autour de la sous-traitance agrégée peut être exprimé comme suit :

$$PG3 = \{ Y_{it} \mid i = 1..N, t \in TA \}$$

Le plan de guidage PG3 impose au niveau détaillé de respecter les volumes agrégés des sous-traitances fixés par produit et par macro-période. Ce guidage a l'avantage de ne pas poser de problème d'infaisabilité lors de sa prise en compte par le niveau détaillé

A l'inverse du guidage budgétaire qui préserve un caractère global, le guidage par la sous-traitance présente un aspect « prescriptif ». En effet, il peut être vu comme une consigne plus « stricte » qui cible les décisions de sous-traitance uniquement et agit, par ce biais en faveur de l'optimisation de l'exploitation de l'un des leviers de flexibilité du système de production. Nous analysons ses performances avec celles des autres guidages, dans le chapitre 5.

### 3.2.2 Intégration des contraintes de guidage par la sous-traitance au niveau détaillé

Au niveau détaillé, le respect des volumes agrégés sous-traités, par produit et par macro-période, se fait d'une manière dynamique tel qu'illustré par la figure IV-7. Les contraintes assurant le suivi du volume agrégé de sous-traitance sont intégrées dans le modèle détaillé  $M^s$ .

#### Niveau Agrégé

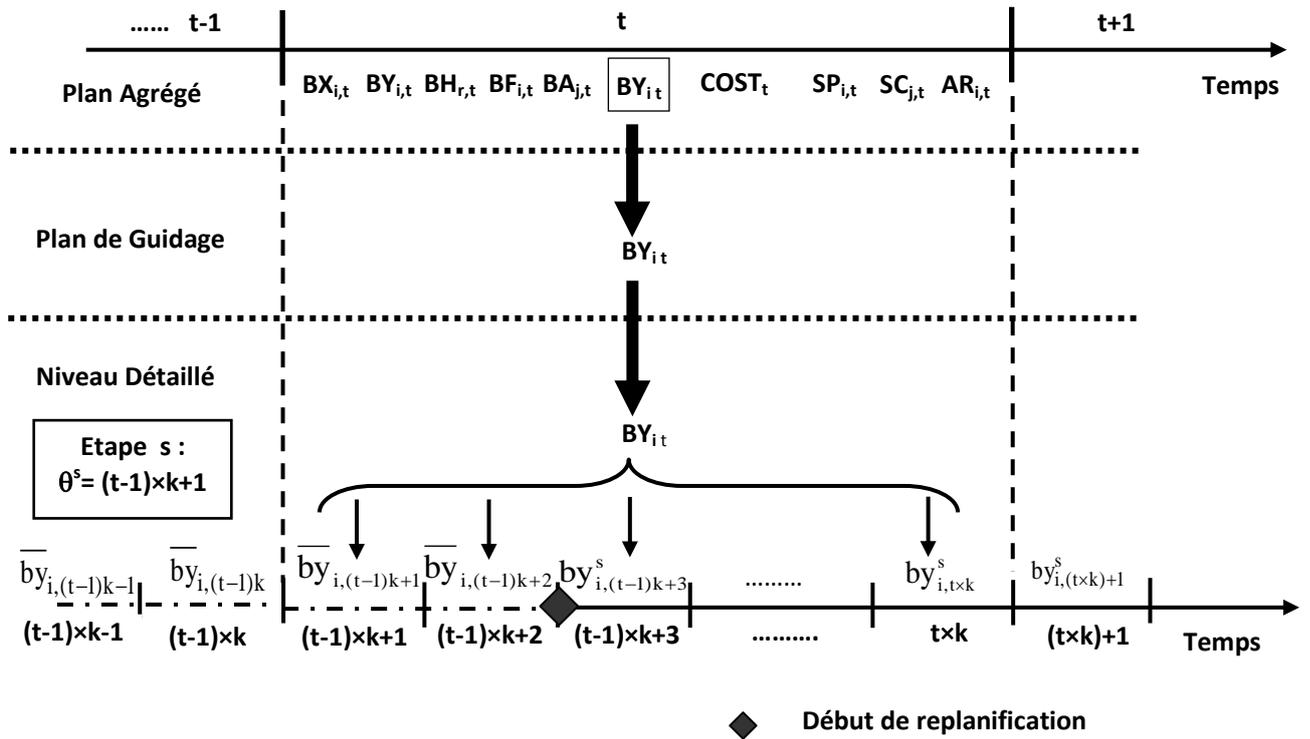


Figure IV-6 Suivi dynamique détaillé du guidage par sous-traitance agrégée

NOUS AVONS CHOISI de transmettre à travers le plan de guidage, les décisions d'engagement car ce sont les décisions qui sont prises directement par le décideur. Les contraintes peuvent être formulées comme suit :

$$\sum_{\tau=\theta^s}^{t \times k} \bar{by}_{i,\tau}^s + \sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{\theta^s - 1} \bar{by}_{i,\tau} \leq BY_{i,t} \quad \forall i = 1..N \quad t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil \quad (43)$$

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{t \times k} \bar{by}_{i,\tau}^s \quad \forall i = 1..N \quad t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil + 1..TA \quad (44)$$

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{\theta^s - 1} \bar{by}_{i,\tau} \leq BY_{i,t} \quad \forall i = 1..N \quad \forall t = 1 .. \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil - 1 \quad (45)$$

## Conclusion

La conception de ce niveau supérieur de la hiérarchie à deux niveaux que nous préconisons a été très délicate :

- D'abord, nous avons tenu à ne pas toucher au modèle générique de la dynamique du niveau inférieur que nous avons conçu, dès le départ, pour être le plus ouvert possible à la réactivité face aux incertitudes. Il fallait, donc, que les plans de guidage puissent être formulés par des contraintes portant sur des variables manipulées par le niveau inférieur.
- En même temps, nous avons veillé à ce que le niveau supérieur tienne compte le plus possible des caractéristiques de la dynamique du niveau inférieur, dont notamment les délais d'anticipation et de réalisation des décisions. Nous avons obtenu, de là, un modèle du niveau supérieur quasi-semblable au modèle du niveau inférieur mais à données et résolutions agrégées.
- Nous avons été amenés, pour cela, à développer de façon fine la correspondance entre les données détaillées du niveau inférieur et les données qui les agrègent au niveau supérieur.

Moyennant toutes ces précautions, nous avons montré, à travers les trois exemples de plans de guidage que nous avons étudiés :

- 1) qu'il est possible d'envisager plusieurs variables de guidage pourvu qu'elles correspondent à des variables sur lesquelles le niveau inférieur peut agir (coûts de production, plafond de sous-traitance, limites d'heures supplémentaires, taux de service, etc.)
- 2) que l'intégration de contraintes de guidage dans le modèle du niveau inférieur peut s'effectuer de manière claire et rigoureuse,
- 3) qu'une analyse approfondie des plans de guidage permet de cerner le fond pertinent sur lequel il faut se focaliser, en évitant d'alourdir les contraintes de guidage par des éléments susceptibles de dérouter sensiblement l'optimisation au niveau inférieur ou, carrément, créer des situations d'infaisabilité.

Il reste à préciser l'élément le plus important dont nous n'avons pas parlé jusqu'ici : l'intérêt du niveau hiérarchique est de tenir compte d'éléments de données dont le niveau inférieur ne dispose pas ou auxquelles il n'a pas accès. Dans le cas, par exemple, du guidage par le volume de sous-traitance, le niveau hiérarchique va s'appuyer sur des considérations et données propres, en plus des simulations qu'il peut effectuer par le biais de son modèle décisionnel, pour déterminer une consigne de seuil de la sous-traitance. Sans cela, une consigne arrêtée simplement sur la base d'une évaluation agrégée, alors que le niveau inférieur est capable de la faire de façon plus fine et avec des données plus actualisées, serait dénuée de sens.



# *Chapitre V*

## **Simulation et expérimentation numérique de la structure décisionnelle hiérarchisée**

### **Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons développé les aspects théoriques de notre structure décisionnelle hiérarchique. Le présent chapitre se focalise sur l'évaluation des performances de cette structure décisionnelle. Dans une telle évaluation, nous nous intéressons plus particulièrement à la notion de robustesse dans notre structure décisionnelle et à la notion de réactivité face aux incertitudes de la demande associée au processus dynamique de décision.

Dans ce cadre, nous menons différentes expérimentations. Une première expérimentation vise la validation du modèle agrégé MA que nous avons défini au chapitre précédent. Cette expérimentation s'appuie sur la comparaison de MA avec un modèle agrégé classique. Ensuite, une deuxième série d'expérimentations a pour objectif l'évaluation des performances de notre structure décisionnelle pour les différents types de guidages spécifiés au quatrième chapitre et pour différentes formes d'incertitude de la demande détaillée.

Toutes les expérimentations réalisées sont effectuées à l'aide d'un logiciel que nous avons développé pour assurer la simulation de la structure décisionnelle proposée dans un contexte incertain et dynamique. Ces expérimentations sont menées sur la base d'un même problème de production et sont évaluées à l'aide de différents indicateurs de performance que nous avons établis.

Dans un premier temps nous présentons l'outil de simulation. Puis, nous développons les indicateurs de performance que nous utilisons. Dans un troisième temps, nous détaillons le problème de production qui fait l'objet des simulations. Enfin, nous analysons les différentes expérimentations réalisées. Nous finissons par une conclusion de ce chapitre.

## **1 Outil de simulation**

Dans cette section, nous présentons l'outil de simulation que nous avons développé. Dans ce qui suit, nous commençons par décrire le fonctionnement général de cet outil, avant de préciser, dans un deuxième paragraphe, son utilisation dans le cadre précis de notre travail ainsi que les possibilités génériques de son usage.

## 1.1 Présentation de l'outil de simulation de la structure décisionnelle

L'outil de simulation que nous avons implémenté pour pouvoir simuler le fonctionnement de la structure décisionnelle à deux niveaux, est une extension de l'outil de simulation développé pour étudier le processus dynamique de la planification détaillée (chapitre III). La figure V-1 détaille le fonctionnement général et la structure de cet outil qui se fonde sur deux composants principaux.

Le premier composant implémente trois grandes fonctionnalités. La première permet de construire et d'initialiser les données agrégées et les données détaillées statiques. Elle s'appuie alors sur les relations entre données détaillées et données agrégées établies dans le chapitre précédent. La deuxième, assure la résolution du modèle agrégé. Cette fonctionnalité implémente tous les aspects du modèle agrégé MA qui sont développés dans le troisième chapitre. Ainsi, elle génère le plan agrégé optimal du problème traité. Enfin, la troisième fonctionnalité élabore le plan de guidage souhaité à partir du plan optimal.

Le deuxième composant simule le processus dynamique de la planification détaillée. La seule différence entre cet outil et celui que nous avons développé au troisième chapitre concerne le modèle  $M^s$  qui est implémenté. En fait, dans le cadre de la structure à deux niveaux, le modèle  $M^s$  intègre les données du plan de guidage et les contraintes de suivi correspondantes. Les autres fonctionnalités sont identiques à celles présentées dans le troisième chapitre. A la fin du processus, les décisions réellement implémentées lors des différentes étapes de planification sont rassemblées pour constituer le plan réel  $P^r$ .

Le développement informatique de l'outil de simulation est réalisé en utilisant le langage Java et le solveur commercial Cplex 12.0 pour la résolution des modèles détaillé et agrégé. D'un point de vue opérationnel, les deux composants de l'outil de simulation peuvent être découplés pour les utiliser séparément.

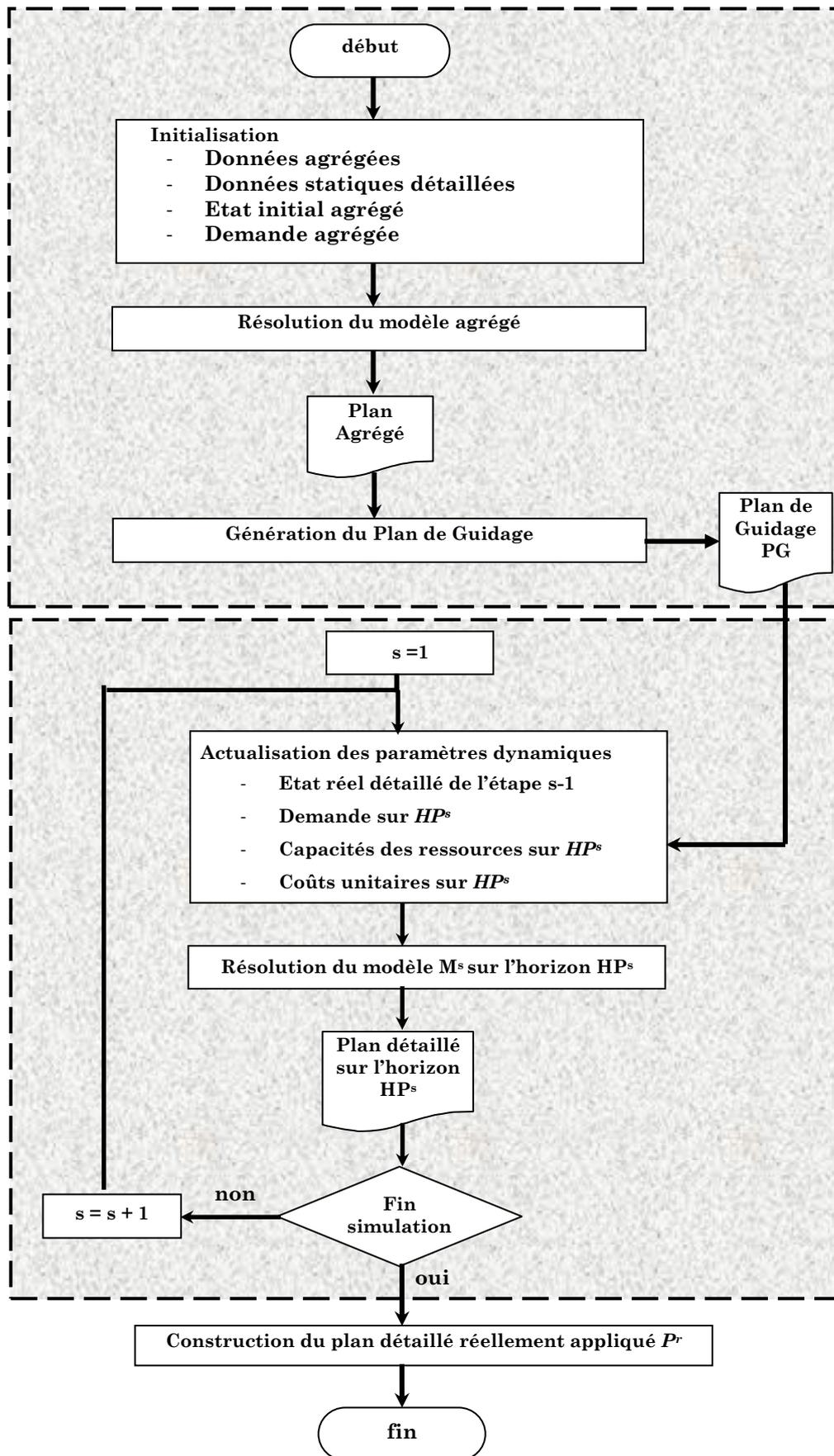


Figure V-1 Fonctionnement général de l'outil de simulation de la structure hiérarchisée

## 1.2 Mise en œuvre de l'outil de simulation

Dans le cadre de notre travail, nous utilisons l'outil de simulation développé pour assurer les deux objectifs suivants :

- 1) Mettre en évidence l'impact du modèle agrégé choisi (MA ou MAC) sur les performances de la structure décisionnelle. Cette analyse est faite pour les trois types de guidage déjà définis dans le chapitre précédent.
- 2) Etudier le comportement de notre structure décisionnelle dans un contexte de planification avec une demande incertaine. Plus précisément, nous nous intéressons à identifier l'effet de l'incertitude de la demande sur chacun des guidages. Dans ce contexte, deux sous-catégories de demande incertaine sont traitées :
  - a) Dans un premier temps, nous considérons que la demande agrégée d'une macro-période donnée est égale à la somme des demandes détaillées des périodes élémentaires qui la composent.
  - b) Dans un second temps, nous considérons que la demande agrégée d'une macro-période donnée n'est pas égale à la somme des demandes détaillées des périodes élémentaires qui la composent.

En fait, la poursuite de ces objectifs, conditionne notre utilisation de l'outil de simulation. Ainsi, pour pouvoir effectuer les différents types d'expérimentations ciblées, nous devons fournir à notre outil les paramètres de simulation suivants, comme l'illustre la figure V-2:

- 1) Les caractéristiques du problème de production (horizon de planification, capacités des ressources, coûts unitaires, etc.)
- 2) Le modèle agrégé.
- 3) La demande agrégée.
- 4) Le type de guidage.
- 5) Le profil de la demande détaillée.

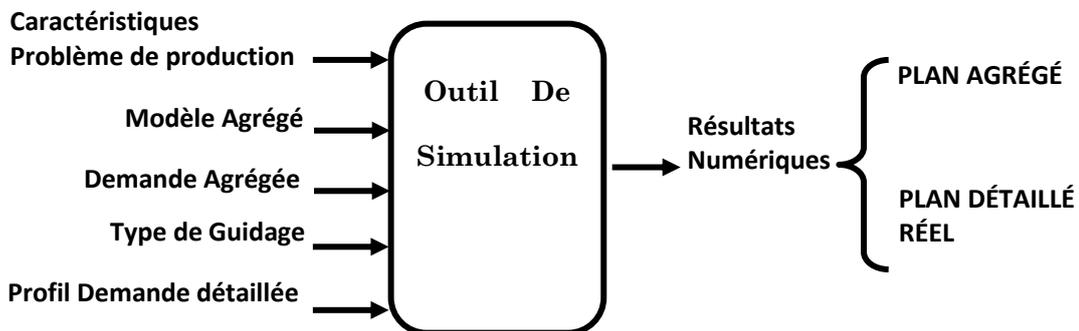


Figure V-2 Paramètres de notre outil de simulation

A l'issue de la simulation effectuée avec les paramètres spécifiés, nous obtenons le plan agrégé optimal qui a été établi par le niveau supérieur et le plan détaillé réel construit à la fin du processus dynamique de planification détaillée.

Dans ce contexte, il est important de signaler que cet outil est relativement flexible puisqu'il permet de réaliser des expérimentations différentes en faisant varier le profil de la demande détaillée, le plan de guidage utilisé et éventuellement, le modèle agrégé implémenté. De plus l'outil permet de simuler des problèmes de production avec d'autres types d'incertitudes, tels que l'incertitude sur les capacités des ressources et/ou l'incertitude sur les coûts unitaires. Il suffit dans ce cas, de réaliser une simulation avec les paramètres adéquats. Des expérimentations de cette nature n'ont pas été traitées dans le cadre de ce travail.

Dans le but de comparer les différents résultats numériques obtenus, nous avons élaboré une démarche générale d'expérimentation ainsi qu'un ensemble d'indicateurs de performance. Ces éléments sont détaillés dans le paragraphe suivant.

## **2 Etude de la performance : Les indicateurs**

Les résultats numériques obtenus par différentes simulations sont comparés sur la base d'indicateurs de performance. Comme nous venons d'illustrer dans le paragraphe précédent, les résultats d'une simulation sont les plans de production, agrégé et détaillé. Dans ce cadre, il est important de souligner que nous sommes face à deux difficultés essentielles pour pouvoir effectuer une telle comparaison. Premièrement, il s'agit de caractériser les indicateurs de performance à utiliser pour pouvoir comparer entre ces deux plans de production. Deuxièmement, comme nous obtenons deux plans avec des grandeurs temporelles différentes (plan agrégé, plan détaillé, macro-période, période élémentaire), il est nécessaire de normaliser les indicateurs pour assurer une comparaison correcte. Ainsi, nous avons élaboré des concepts et une démarche générale d'expérimentation. Le paragraphe suivant est consacré à détailler ces deux aspects.

### **2.1 Concepts et démarche générale d'expérimentation**

Un plan de production, qu'il soit agrégé ou détaillé, peut être caractérisé par :

- 1) Des grandeurs « techniques » (ou physiques) qui se rapportent aux différents flux physiques. Dans ce cadre, nous citons le volume de production interne, le volume de production sous-traitée, le volume de composants approvisionnés, les stocks, les arriérés, etc.
- 2) Des grandeurs « économiques » qui font référence aux flux financiers liés à la production. Ces grandeurs regroupent essentiellement, dans notre travail, les différents coûts calculés (coût total du plan, coût de production interne, coût de production)
- 3) Le taux de service que ce plan procure. Nous rappelons dans ce contexte, que nous avons défini le taux de service au troisième chapitre comme étant le taux de satisfaction de la demande client. Cet indicateur mesure le rapport entre la demande satisfaite et la demande réelle.

Les indicateurs de performance que nous utilisons dans notre travail relèvent des trois catégories énumérées ci-dessus. Dans ce contexte, nous distinguons :

- 1) **Les indicateurs agrégés** : indicateurs qui caractérisent le plan agrégé. Dans ce cas, ils se rapportent à des **macro-périodes**.
- 2) Les indicateurs détaillés : indicateurs qui caractérisent le plan détaillé réel. Ces indicateurs se rapportent ainsi à des périodes élémentaires.
- 3) **Les indicateurs globalisés** définis ci-dessous.

Pour faciliter l'analyse des résultats, les indicateurs détaillés peuvent être **globalisés** sur des **macro-périodes**. La globalisation sur une macro-période donnée des deux premières catégories d'indicateurs se fait par sommation des valeurs mesurées sur chaque période élémentaire appartenant à cette macro-période. La figure V-3, par exemple, illustre la globalisation par sommation du coût total réel détaillé pour la première macro-période.

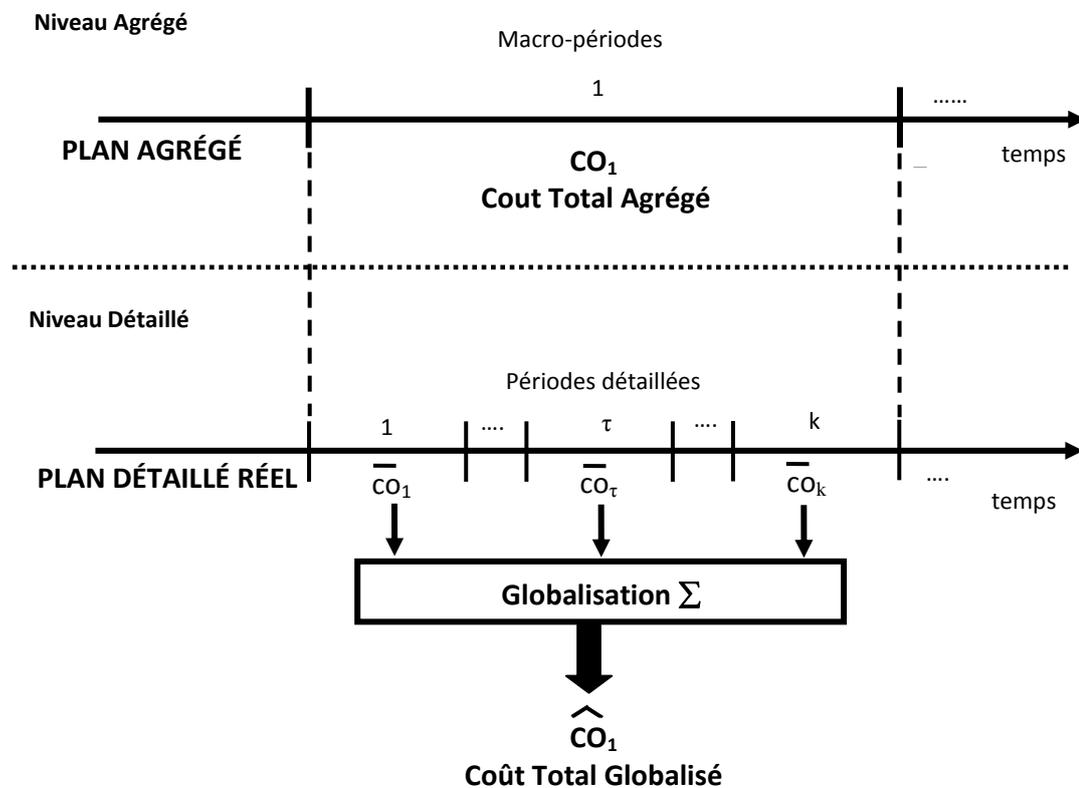


Figure V-3 Exemple de globalisation du coût total réel détaillé

Pour le taux de service, l'indicateur globalisé est obtenu en effectuant la moyenne des taux de services relatifs aux périodes élémentaires de la macro-période considérée.

Ainsi, à partir de ces concepts **d'indicateurs agrégés** et **indicateurs globalisés**, nous pouvons comparer les résultats des différentes simulations à réaliser. La figure V-4, illustre la démarche en prenant un cas simple comportant deux simulations qui diffèrent seulement par le type du plan du guidage.

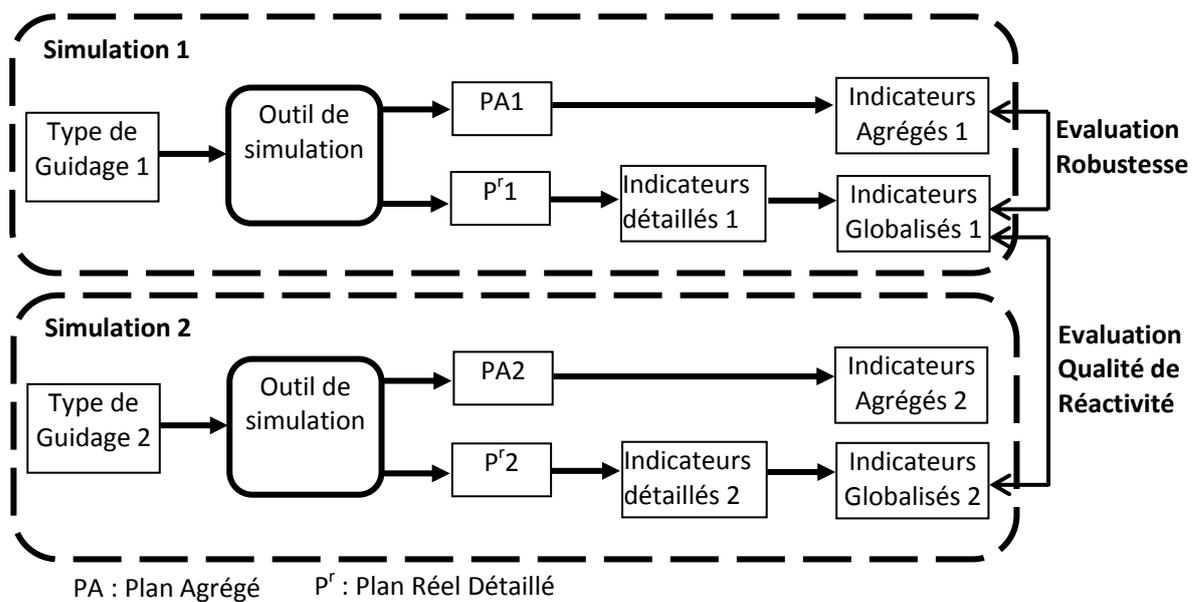


Figure V-4 Illustration de la démarche générale d'expérimentation adoptée dans ce travail

Pour étudier l'impact d'un paramètre donné sur la performance de la structure, nous faisons une simulation pour chaque variation de ce paramètre. Il est possible alors de :

- Comparer, au sein d'une même simulation (c'est-à-dire ici, pour un type de guidage donné), **un indicateur agrégé** et son correspondant **globalisé**. Cette comparaison permet d'évaluer **la robustesse** du plan agrégé vis-à-vis du niveau détaillé c'est-à-dire, la capacité donnée au niveau détaillé pour suivre les décisions agrégées.
- Comparer les indicateurs globalisés issus de deux simulations différentes (c'est à dire pour des types de guidages différents). Cette comparaison met en évidence la réactivité de l'approche en fonction du guidage proposé, c'est-à-dire, sa capacité à absorber les incertitudes et les aléas.

Pour concrétiser, dans l'absolu, la réactivité de la structure, nous proposons aussi de comparer les indicateurs globalisés issus d'une simulation donnée et les indicateurs globalisés issus du **plan idéal PI** relatif à cette simulation. Nous rappelons que nous avons introduit la notion de plan idéal PI au troisième chapitre. PI désigne le plan de production détaillé obtenu si nous connaissons, dès le début de la simulation, la demande réelle de tous les produits sur la totalité de l'horizon de planification détaillé, c'est-à-dire s'il n'y a ni incertitude ni perturbation.

Dans ce paragraphe, nous venons de définir les différents concepts qui fondent les indicateurs que nous envisageons utiliser et nous avons illustré la démarche globale des expérimentations que nous allons réaliser. Dans ce qui suit, nous précisons les indicateurs dont nous faisons l'usage dans nos expérimentations.

## 2.2 Le taux de service

### 2.2.1 Le taux de service détaillé

Le taux de service détaillé, par produit et par période élémentaire, est introduit dans le troisième chapitre. Ce taux est calculé sur la base du plan détaillé réel et sa formule est la suivante:

$$ts_{i,\tau} = \frac{ar_{i,\tau-1} - sp_{i,\tau-1} + d_{i,\tau} ar_{i,\tau}}{ar_{i,\tau-1} + d_{i,\tau} sp_{i,\tau-1}} \quad \forall i = 1..N \quad \forall \tau = 1..TD$$

Le taux de service tous produits confondus est la moyenne sur tous les produits :

$$ts_{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ts_{i,\tau} \quad \forall \tau = 1..TD$$

### 2.2.2 Le taux de service globalisé

Le taux de service globalisé pour chaque macro-période t est calculé sur la base du taux de service détaillé :

$$\overline{TS}_t = \frac{1}{k} \sum_{\tau=(t-1)k+1}^{t \times k} ts_{\tau} \quad \forall t = 1..TA$$

Le taux de service globalisé sur tout l'horizon agrégé est la moyenne des taux de service sur les différentes macro-périodes :

$$\overline{TS} = \frac{1}{TA} \sum_{t=1}^{TA} \overline{TS}_t$$

### 2.2.3 Le taux de service agrégé

Par analogie avec le taux de service détaillé, le taux de service agrégé est calculé par macro-période :

$$TS_{i,t} = \frac{AR_{i,t-1} - SP_{i,t-1} + D_{i,t} - AR_{i,t}}{AR_{i,t-1} + D_{i,t} - SP_{i,t-1}} \quad \forall i = 1..N \quad \forall t = 1..TA$$

Le taux de service agrégé tous produits confondus s'écrit comme suit :

$$TS_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N TS_{i,t} \quad \forall t = 1..TA$$

Enfin, le taux de service agrégé sur tout l'horizon agrégé, tous produits confondus, est le suivant :

$$TS = \frac{1}{TA} \sum_{t=1}^{TA} TS_t$$

Dans les simulations que nous réalisons, nous n'utilisons que les formes « tous produits confondus » pour les taux de service agrégé et globalisé.

## 2.3 Les indicateurs économiques

### 2.3.1 Le coût total

Le cout total du plan de production représente en fait, la fonction objectif du processus de planification qu'il soit détaillé ou agrégé. Dans ce contexte, nous utilisons les formes suivantes de cet indicateur :

- $CO_t$  : désigne le coût total agrégé de la macro-période t.
- $\overline{CO}_t$  : désigne le coût total globalisé de la macro-période t. Ce coût est obtenu par la sommation des coûts totaux sur les périodes élémentaires constituant la macro-période t. La formule détaillée de calcul du coût total sur une période élémentaire est développée dans le troisième chapitre

Le coût total, agrégé ou globalisé, sur la totalité de l'horizon agrégé est obtenu via la sommation des coûts totaux relatifs à chaque période agrégée appartenant à l'horizon agrégée.

### 2.3.2 Le coût de production (CP) et le coût de production interne (CPI)

Nous rappelons que le coût de production CP que nous avons défini lors du chapitre précédent, représente le coût dépensé dans des actions ayant une valeur ajoutée directe dans la production. Ainsi, ce coût ne contient ni les coûts des arriérés ni les coûts des stocks de produits finis ou de composants. Un tel coût caractérise le budget nécessaire pour réaliser la production agrégée. Le coût de production interne CPI représente le coût de production CP plus les coûts de stock.

Dans ce cadre, nous utilisons les notations suivantes :

- $\overline{CP}_t$  : désigne le coût de production agrégé de la macro-période t.
- $\overline{CPI}_t$  : désigne le coût de production globalisé de la macro-période t.
- $CP_t$  : désigne le coût de production globalisé de la macro-période t.
- $CPI_t$  : désigne le coût de production interne agrégé de la macro-période t.

### 2.3.3 La sous-traitance

Nous avons choisi d'utiliser le volume total de la sous-traitance comme indicateur. Cette grandeur physique, présente un levier de flexibilité dans notre système de production. Ainsi, le bon paramétrage du volume de production sous-traité représente un moyen pour faire face à l'incertitude de la demande et pour accroître la réactivité de notre structure décisionnelle.

Dans ce cadre nous définissons les indicateurs suivants relatifs à la sous-traitance. Ces indicateurs seront calculés pour tous produits confondus :

- $ST_t$  : désigne la sous-traitance agrégée de la macro-période t.
- $\overline{\overline{ST}}_t$  : désigne la sous-traitance globalisée de la macro-période t.

Pour obtenir cet indicateur sur la totalité de l'horizon agrégé, il suffit de sommer sur les périodes agrégées.

## 2.4 Les indicateurs de qualité de réactivité

Pour apprécier les performances de l'approche à deux niveaux par rapport à celles du plan idéal (qui peut être assimilé à « une réactivité idéale » puisqu'il est calculé avec une connaissance parfaite des demandes) nous définissons un ensemble d'indicateurs de qualité de réactivité.

### 2.4.1 Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production IQCP

Cet indicateur mesure l'écart entre le coût de production globalisé obtenu par expérimentation et son correspondant pour le plan idéal. Il s'écrit comme suit :

$$IQCP_t = \frac{\overline{\overline{CP}}_t - \overline{\overline{CP}}_t^{ideal}}{\overline{\overline{CP}}_t^{ideal}} \quad \forall t=1..TA$$

$$IQCP = \frac{\sum_t \overline{\overline{CP}}_t - \sum_t \overline{\overline{CP}}_t^{ideal}}{\sum_t \overline{\overline{CP}}_t^{ideal}}$$

### 2.4.2 Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production interne IQCPI

Cet indicateur mesure l'écart entre le coût de production interne globalisé obtenu par expérimentation et son correspondant pour le plan idéal. Il s'écrit comme suit :

$$IQCPI_t = \frac{\overline{\overline{CPI}}_t - \overline{\overline{CPI}}_t^{ideal}}{\overline{\overline{CPI}}_t^{ideal}} \quad \forall t=1..TA$$

$$IQCPI = \frac{\sum_t \overline{\overline{CPI}}_t - \sum_t \overline{\overline{CPI}}_t^{ideal}}{\sum_t \overline{\overline{CPI}}_t^{ideal}}$$

### 2.4.3 Indicateur de qualité de réactivité vis-à-vis de la sous-traitance IQST

Cet indicateur mesure l'écart entre la sous-traitance globalisée obtenue par expérimentation et son correspondant obtenu par le plan idéal. Il s'écrit comme suit :

$$IQST_t = \frac{\overline{\overline{ST_t}} - \overline{\overline{ST_t}}^{ideal}}{\overline{\overline{ST_t}}^{ideal}} \quad \forall t=1..TA$$

$$IQST = \frac{\sum_t \overline{\overline{ST_t}} - \sum_t \overline{\overline{ST_t}}^{ideal}}{\sum_t \overline{\overline{ST_t}}^{ideal}}$$

## 2.5 Les indicateurs de robustesse

Dans notre travail, un indicateur de robustesse mesure la dispersion de la valeur globalisée d'une grandeur donnée par rapport à sa valeur agrégée. Dans ce cadre, nous avons choisi de mesurer la robustesse pour les deux grandeurs suivantes : le coût de production CP et la sous-traitance (tous produits confondus).

### 2.5.1 Indicateurs de robustesse du coût total

Cet indicateur mesure l'écart entre le coût total globalisé et le coût total agrégé.

$$IRCO_t = \frac{\overline{\overline{CO_t}} - CO_t}{CO_t} \quad \forall t=1..TA$$

$$IRCO = \frac{\sum_t \overline{\overline{CO_t}} - \sum_t CO_t}{\sum_t CO_t}$$

Avec :

- $CO_t$  : désigne le coût total agrégé de la macro-période t.
- $\overline{\overline{CO_t}}$  : désigne le coût total globalisé de la macro-période t

La robustesse s'améliore lorsque la valeur de l'indicateur diminue. Elle est parfaite, lorsque l'indicateur est nul.

### 2.5.2 Indicateurs de robustesse du coût de production

Cet indicateur mesure l'écart entre le coût de production globalisé et le coût de production agrégé.

$$IRCP_t = \frac{\overline{\overline{CP_t}} - CP_t}{CP_t} \quad \forall t=1..TA$$

$$IRCP = \frac{\sum_t \overline{\overline{CP_t}} - \sum_t CP_t}{\sum_t CP_t}$$

Avec :

- $CP_t$  : désigne le coût de production agrégé de la macro-période t.
- $\overline{\overline{CP_t}}$  : désigne le coût de production globalisé de la macro-période t

### 2.5.3 Indicateurs de robustesse du coût de production interne

Cet indicateur mesure l'écart entre le coût de production interne globalisé et le coût de production interne agrégé.

$$IRCPI_t = \frac{\overline{\overline{CPI_t}} - CPI_t}{CPI_t} \quad \forall t=1..TA$$

$$IRCPI = \frac{\sum_t \overline{\overline{CPI_t}} - \sum_t CPI_t}{\sum_t CPI_t}$$

Avec :

- $CPI_t$  : désigne le coût de production interne agrégé de la macro-période t,
- $\overline{\overline{CPI_t}}$  : désigne le coût de production interne globalisé de la macro-période t.

### 2.5.4 Indicateurs de robustesse de la sous-traitance

Cet indicateur mesure l'écart entre la sous-traitance globalisée et la sous-traitance agrégée.

$$IRST_t = \frac{\overline{\overline{ST_t}} - ST_t}{ST_t} \quad \forall t=1..TA$$

$$IRST = \frac{\sum_t \overline{\overline{ST_t}} - \sum_t ST_t}{\sum_t ST_t}$$

- $ST_t$  : désigne la sous-traitance agrégée de la macro-période  $t$ .
- $\overline{ST}_t$  : désigne la sous-traitance globalisée de la macro-période  $t$ .

Après avoir défini les différents indicateurs que nous utilisons dans les simulations numériques, nous détaillons dans la section suivante les caractéristiques du problème de production qui constitue la base de toutes les expérimentations envisagées.

### 3 Caractéristiques du problème traité

Dans cette section, nous présentons les différentes caractéristiques du problème de production qui est utilisé par les différentes expérimentations. Le problème de nature académique est choisi suffisamment simple pour faciliter l'analyse des résultats et apprécier les propriétés de l'approche proposée. Ces caractéristiques sont structurées en trois paragraphes : les caractéristiques physiques, les coûts et les caractéristiques temporelles.

#### 3.1 Les caractéristiques physiques

Nous considérons une usine qui fabrique 2 produits finis (P1, P2) en ayant recours à deux différents types de composants (J1 et J2). La nomenclature des trois produits est donnée par la figure V-5 suivante.

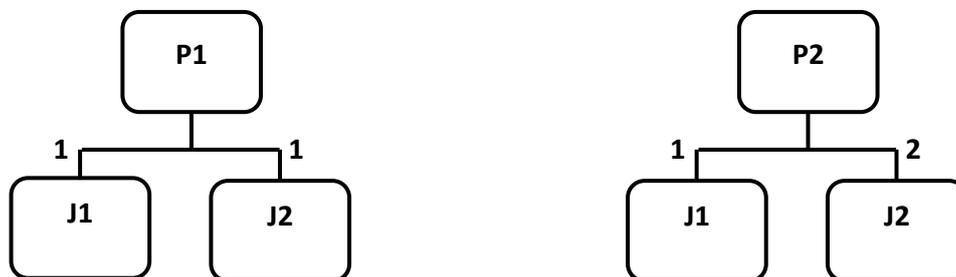


Figure V-5 Nomenclatures de P1 et P2

La fabrication des deux produits est assurée par une seule ressource R1. Dans ce cadre, chaque produit consomme 1 unité temporelle (ut) de la ressource R1 afin d'accomplir sa production en interne. La capacité d'utilisation de R1 est limitée pour chaque période détaillée. De même, un volume maximum d'heures supplémentaires est autorisé sur R1 pour chaque période détaillée. Ces restrictions sur l'utilisation des ressources et des heures supplémentaires se présentent comme suit :

- La capacité maximale de la ressource R1 est fixée à 90 ut par période détaillée,
- Le volume maximal d'heures supplémentaires alloué par période détaillée est de 10 ut.
- Stocks et arrières initiaux sont nuls pour tous les produits et composants.

### 3.1.1 Les caractéristiques temporelles

Dans ce problème, nous adoptons un horizon de planification de la production qui s'étend sur 20 périodes détaillées. **Le facteur d'agrégation est  $k = 10$**  conduisant à **2 périodes agrégées**. Les délais d'anticipation et de réalisation des différentes décisions sont spécifiés par le tableau V-1. Ces délais sont exprimés en périodes.

Type de décision	DELAI ANTICIPATION	DELAI REALISATION
Production en Interne P1	1	1
Production en Interne P2	1	1
Sous-traitance P1	2	2
Sous-traitance P2	1	2
Achat composant O1	1	0
Achat composant O2	1	0
Heures supplémentaires R1	1	0

**Tableau V-1** Les délais d'anticipation et de réalisation des différentes décisions selon notre approche

La longueur d'une période agrégée (10 périodes détaillées) est choisie assez grande par rapport aux différents délais d'anticipation et de réalisation afin d'atténuer leur effet sur les encours agrégés au niveau supérieur.

### 3.1.2 Les coûts unitaires

Le tableau V-2 fournit les coûts unitaires d'engagement relatifs à chaque type de décision ainsi que les coûts unitaires de stockage de produits finis, de stockage de composants et d'arriérés de production.

	Horizon de planification : périodes de 1 à 20
Coût unitaire d'engagement Production en Interne d'une unité de P1	2
Coût unitaire d'engagement Production en Interne d'une unité de P2	2
Coût unitaire d'engagement Sous Traitance d'une unité de P1	15
Coût unitaire d'engagement Sous Traitance d'une unité de P2	15
Coût unitaire d'engagement Achat d'une unité du composant O1	1
Coût unitaire d'engagement Achat d'une unité du composant O2	2
Coût unitaire d'engagement d'une heure supplémentaire sur R1	2
Coût unitaire du stockage d'un produit P1	2
Coût unitaire du stockage d'un produit P2	2
Coût unitaire du stockage d'un composant O1	1

Coût unitaire du stockage d'un composant O2	1
Coût unitaire d'un arriéré du produit P1	100
Coût unitaire d'un arriéré du produit P2	100
Coût unitaire d'engagement Achat direct d'une unité de P1	1000
Coût unitaire d'engagement Achat direct d'une unité de P2	1000

**Tableau V-2 Les coûts unitaires d'engagement des décisions, de stockage et d'arriérés**

Pour simplifier, nous proposons que les différents coûts ne varient pas lors du processus dynamique de planification détaillé. Le paramétrage des valeurs des différents coûts est réalisé de telle sorte qu'il impose des préférences de gestion. Compte tenu des coûts d'arriérés élevés, le système de planification cherchera à satisfaire la demande. Si la production interne n'est pas suffisante, l'ajustement se fera d'abord avec les heures supplémentaires puis avec la sous-traitance. Pour simplifier, il n'est pas possible dans les simulations d'acheter directement des produits finis à cause du coût très élevé de cette décision.

Ayant ainsi détaillé les différentes caractéristiques du problème détaillé, nous présentons dans ce qui suit, les expérimentations réalisées. Dans ce contexte, nous commençons par présenter l'expérimentation de la valorisation de notre modèle agrégé MA. Ensuite, l'expérimentation avec une demande agrégée certaine. Enfin, l'expérimentation avec une demande agrégée incertaine.

## **4 Expérimentation pour valider le modèle agrégé MA.**

### **4.1 Principe et déroulement de l'expérimentation**

Le but de cette expérimentation est de comparer les comportements de la structure selon que l'on utilise notre modèle agrégé MA ou le modèle agrégé classique MAC. Dans ce contexte nous rappelons les caractéristiques de ces deux modèles.

- 1) Le modèle agrégé MA, tel que nous l'avons détaillé au chapitre précédent, présente l'originalité de prendre en compte les délais temporels détaillés qui sont matérialisés sous forme de contraintes d'encours.
- 2) Le modèle agrégé classique MAC ignore les délais temporels détaillés et n'intègre pas les contraintes d'encours.

Toutefois, la comparaison entre les deux modèles ne se fait pas de manière directe en examinant la formulation mathématique de chaque modèle. Il s'agit plutôt de comparer les plans réels obtenus selon différents plans de guidage issus de chacun des deux modèles agrégés MA et MAC. Dans ce cadre, nous avons choisi d'utiliser les deux plans de guidages suivants :

- 1) PG1= {  $CPI_{i,t} \mid i = 1..N, t = 1..TA$  } : c'est le guidage par coût de production interne, par produit et par macro-période ;
- 2) PG2= {  $Y_{i,t} \mid i = 1..N, t = 1..TA$  } : c'est le guidage par le volume de sous-traitance agrégé, par produit et par macro-période ;

La figure V-7 détaille le déroulement de cette expérimentation pour le premier plan de guidage PG1. Dans ce contexte, deux points essentiels doivent être éclaircis :

- 1) Pour chaque simulation, le plan agrégé PA ne dépend que du modèle agrégé utilisé puisque nous utilisons le même problème et le même profil de la demande à chaque simulation. Ceci explique la présentation de PA en fonction du modèle agrégé utilisé dans la figure V-6.
- 2) Pour les mêmes raisons citées dans le premier point, le plan réel détaillé  $P^r$ , ne dépend, dans ce cas, que du plan de guidage élaboré à partir du plan agrégé.

Pour obtenir les résultats concernant le deuxième plan de guidage PG2, il suffit d'appliquer la même démarche de simulation.

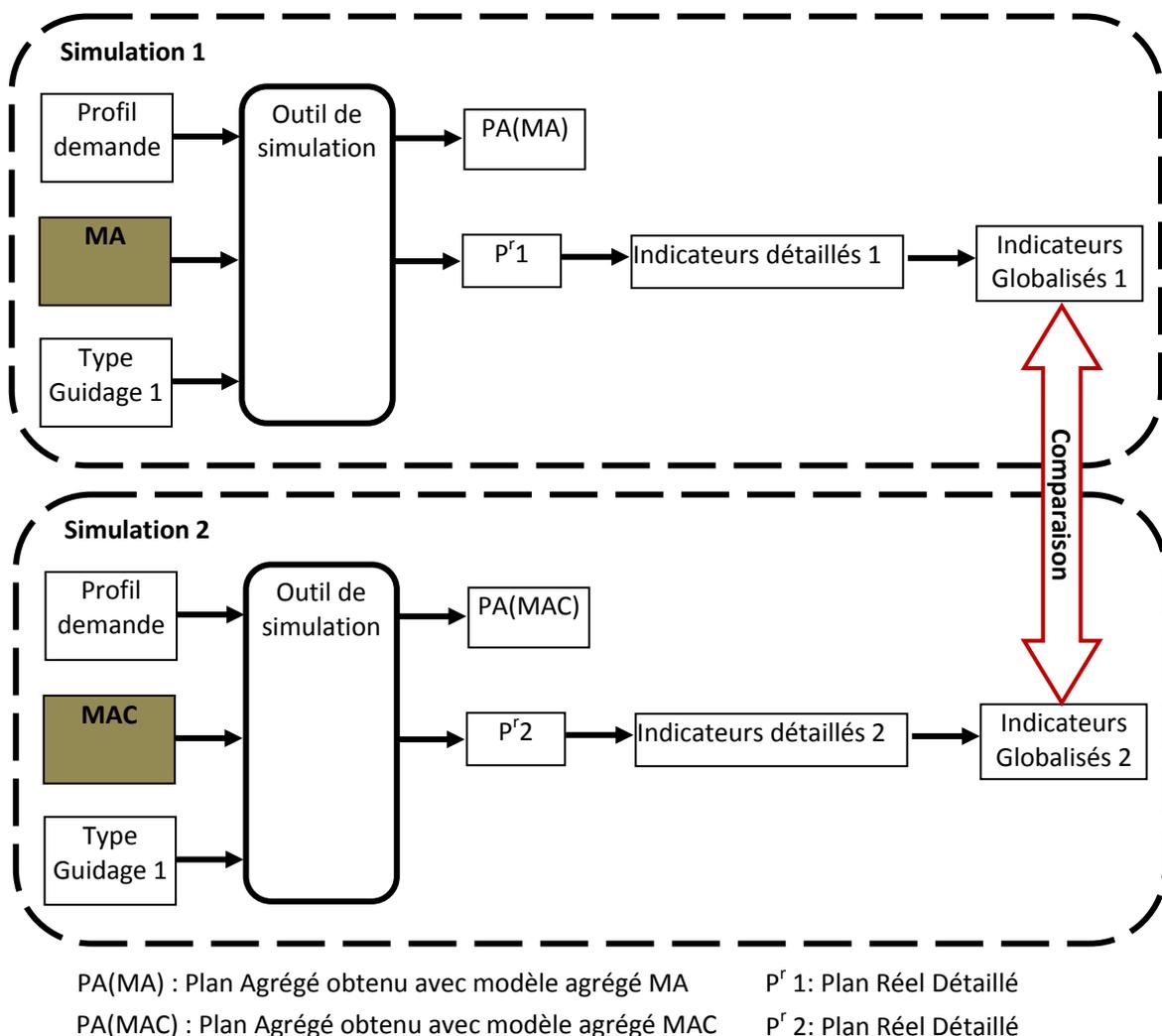


Figure V-6 Illustration de la démarche d'expérimentation avec une variation du modèle agrégé adopté

## 4.2 Demande agrégée et demande détaillée

La demande agrégée est indiquée par le tableau suivant :

Macro-période	t1	t2
Demande Agrégée P1	500	500
	1000	
Demande Agrégée P2	600	600
	1200	

Tableau V-3 Demande agrégée

Le profil de la demande détaillée utilisé est le même pour les différentes simulations de cette expérimentation. Ce profil est précisé par le tableau V-4 et la figure V-7.

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	75	75	70	70	70	70	70
Demande détaillée P2	0	0	0	90	90	90	90	80	80	80
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Demande détaillée P2	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Tableau V-4 Profil de la demande détaillée

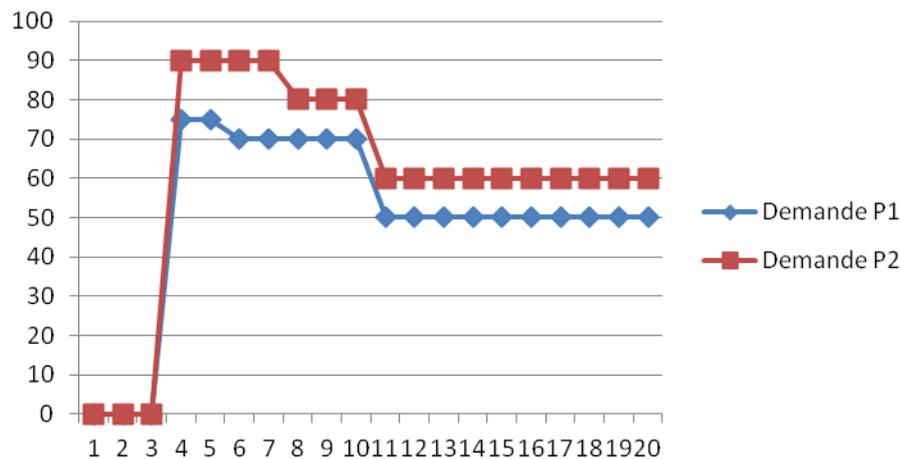


Figure V-7 Profil de la demande détaillée

Il est important de remarquer les deux points suivants :

- 1) La demande détaillée reste identique en volume à la demande agrégée, pour les deux produits.
- 2) Les demandes nulles pour les trois premières périodes détaillées sont choisies volontairement pour annuler l'effet des stocks initiaux nuls que nous avons

identifiés dans le troisième chapitre (ce que nous avons appelé le régime transitoire de la planification).

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les résultats numériques obtenus par cette première expérimentation.

### 4.3 Résultats numériques de l'expérimentation : Plans agrégés PA(MA) et PA(MAC)

Nous détaillons dans ce paragraphe les résultats numériques des deux plans agrégés. Ceci, nous permet de déduire les différents plans de guidage issus de chacun de ces deux plans. Les tableaux V-5 et V-6 présentent dans l'ordre, les valeurs numériques du plan agrégé obtenu à l'aide du modèle agrégé classique MAC, et les valeurs numériques du plan agrégé obtenu à l'aide de notre modèle agrégé MA. Les résultats sont affichés par période agrégée pour les deux tableaux.

	MAC		MA	
	t1	t2	t1	t2
Coût Total Agrégé CO	8200	8200	12619	7148
	16400		19767	
Coût Production Interne CPI	8200	8200	12619	7148
	16400		19767	
Production Agrégée (P1et P2)	1000	1000	1000	1000
	2000		2000	
Heures supplémentaires Agrégées	100	100	100	100
	200		200	
Sous-traitance Agrégée (P1 et P2)	100	0	403	8
	100		411	
Stock agrégé (P1 et P2)	0	0	0	0
	0		0	
Arriéré agrégé (P1 et P2)	0	0	0	0
	0		0	
Taux de Service agrégé TS	100%	100%	100%	100%
	100%		100%	

Tableau V-5 Plan Agrégé selon le modèle agrégé classique (MAC) et notre Modèle Agrégé MA

Nous remarquons que les plans agrégés issus des deux modèles ont un taux de service agrégé de 100%. Les stocks et les arriérés en fin de chaque macro-période sont nuls.

Par contre, le plan agrégé issu de notre modèle agrégé PA(MA), présente un coût total plus grand que celui obtenu avec le plan agrégé issu du modèle agrégé classique PA(MAC). Plus précisément, PA(MA) affiche un coût plus élevé que PA(MAC) pour la première période agrégée. Ceci est dû au fait que MA prend en compte les délais d'anticipation et de

réalisation détaillés. PA(MA) engage pour la première période agrégé un volume de production et de sous-traitance plus important que ce que décide PA(MAC). Ceci explique la différence de coût total agrégé entre les deux plans. Cette stratégie devait permettre une meilleure satisfaction de la demande au niveau détaillé.

Sur la base de ces deux plans agrégés, nous établissons les différents plans de guidage qui seront utilisés par le processus dynamique de planification pour obtenir les plans réels. Le tableau V-6 indique pour chaque plan de guidage et chaque modèle agrégé choisi, les valeurs qui sont transmises au niveau détaillé.

	MA		MAC	
	t1	t2	t1	t2
PG1(CPI)	12 618,88	7148,38	8200	8200
	19 767,26		16400	
PG2(ST)	402,77	8,24	100	0
	411		100	

Tableau V-6 Plans de guidage PG1 et PG2

Le tableau V-7 fournit les caractéristiques globalisées jugées les plus significatives des plans réels issus des expérimentations notamment les coûts totaux et internes, la sous-traitance et le taux de service. Les trois dernières lignes (IRCO, IRCPI et IRST) évaluent la robustesse du plan réel vis-à-vis du plan agrégé. Rappelons qu'on est d'autant plus robuste que l'indicateur se rapproche de zéro.

	PLAN RÉEL 1 OBTENU PAR PG1		PLAN RÉEL 2 OBTENU PAR PG2	
	MA	MAC	MA	MAC
$\overline{\overline{CO}}$	20 741,19	198.099,5	19 674,639	260 230
$\overline{\overline{CPI}}$	19 229,99	16.399,5	19 674,639	15 230
$\overline{\overline{ST}}$	399,99	312,5	399,999	100
$\overline{\overline{TS}}$	99,26%	65,78%	100%	55,89%
IRCO	2,7%	$11,07 \times 10^2$ %	0%	$14,86 \times 10^2$ %
IRCPI	2,7%	0,5%	0%	7%
IRST	3%	212,5%	3%	0%

Tableau V-7 Résultats numériques de l'expérimentation de valorisation de notre modèle agrégé MA

En examinant les résultats, nous établissons les conclusions suivantes :

- 1) Quel que soit le type de guidage, l'approche basée sur MA conduit à un bien meilleur taux de service globalisé que celle basée sur MAC. Ceci conforte donc l'intérêt du modèle MA qui s'appuie sur une vision beaucoup plus réaliste du niveau détaillé. Les décisions agrégées prises (notamment l'engagement plus

important en première macro-période) permettent de satisfaire correctement la demande détaillée.

- 2) Le modèle MA est beaucoup plus robuste vis-à-vis du coût total. En fait, quel que soit le guidage, les coûts totaux globalisés obtenus par l'approche basée sur MA sont plus proches des coûts totaux agrégés. Ceci confirme bien que MA adopte une vision plus réaliste que celle adoptée par MAC.

Cette expérimentation nous a permis de mettre en évidence la performance de notre modèle agrégé MA. Dans toutes les expérimentations qui suivent, nous utilisons MA pour réaliser les simulations numériques.

## 5 Expérimentation dans le cas d'une demande agrégée certaine

Dans le cadre de ce paragraphe, nous nous plaçons dans le contexte où la demande agrégée est « certaine », c'est-à-dire que pour n'importe quelle macro-période, la demande agrégée est égale à la somme des demandes détaillées associées aux périodes élémentaires composant cette macro-période. Cela correspond à une prévision agrégée parfaite.

Par ailleurs, les contraintes d'encours qui sont intégrées dans le modèle agrégé MA se basent sur une équirépartition au sein de chaque macro-période de la production et des demandes détaillées.

L'objectif de cette série d'expérimentation est d'analyser les performances de la structure lorsque cette hypothèse d'équirépartition n'est pas vérifiée. Ainsi, nous considérons dans ce paragraphe que la demande agrégée relative à une macro-période se répartit irrégulièrement au sein de cette macro-période constituant des « pics » de demande détaillée, ce qui se rapproche d'une réalité industrielle souvent chaotique au niveau de la demande.

### 5.1 Demande agrégée et profils détaillés

La demande agrégée considérée est celle du tableau V-3 rappelée ci-dessus.

	t1	t2
Demande Agrégée P1	500	500
	1000	
Demande Agrégée P2	600	600
	1200	

Tableau V-8 Rappel de la demande agrégée certaine

Nous considérons trois différents profils de demande détaillée. Chaque profil se caractérise par l'existence de deux pics de la demande détaillée pour le produit P1. Le premier pic est toujours situé dans la première macro-période, alors que le deuxième pic est toujours situé dans la deuxième macro-période. La différence entre les trois profils est

liée à l'emplacement de chaque pic dans la macro-période. Ainsi, nous distinguons les trois cas suivants :

- 1) Le premier profil de demande détaillée se caractérise par deux pics qui se situent au début de chaque macro-période,
- 2) Le deuxième profil de demande détaillée se caractérise par deux pics qui se situent à la fin de chaque macro-période,
- 3) Le troisième profil se caractérise par un premier pic qui est à la fin de la première macro-période et un deuxième pic qui se place au début de la deuxième macro-période.

Les différents positionnements de ces pics au sein des macro-périodes correspondent à des cas « extrêmes » permettant d'apprécier la robustesse du plan agrégé et la réactivité de la structure.

Ces trois profils sont illustrés par les tableaux V-9, V-10 et V-11 ainsi que les figures V-8, V-9 et V-10.

**Profil 1 : Pic de la demande calé vers le début des périodes agrégées**

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	160	150	150	10	10	10	10
Demande détaillée P2	0	0	0	80	80	80	90	90	90	90
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	150	150	150	10	10	10	5	5	5	5
Demande détaillée P2	120	120	110	35	35	35	35	45	40	25

Tableau V-9 Demande détaillée profil 1

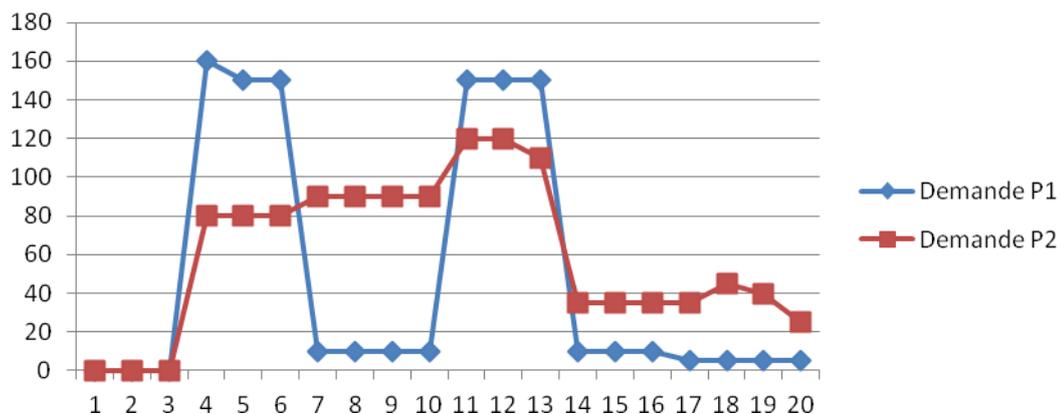


Figure V-8 Profil 1 de la demande détaillée

**Profil 2 : Pic de la demande calé vers la fin des périodes agrégées**

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	10	10	10	10	160	150	150
Demande détaillée P2	0	0	0	80	80	80	90	90	90	90
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	10	10	10	5	5	5	5	150	150	150
Demande détaillée P2	35	35	35	35	45	40	25	120	120	110

Tableau V-10 Demande détaillée du profil 2

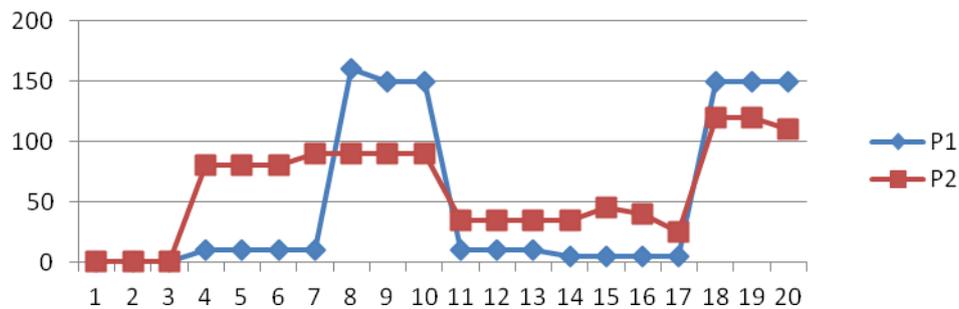


Figure V-9 Profil 2 de la demande détaillée

**Profil 3 : Pic de la demande en cloche (fin de la première période agrégée et début de l'autre)**

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	10	10	10	10	160	150	150
Demande détaillée P2	0	0	0	80	80	80	90	90	90	90
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	150	150	150	10	10	10	5	5	5	5
Demande détaillée P2	120	120	110	35	35	35	35	45	40	25

Tableau V-11 Demande détaillée du profil 3

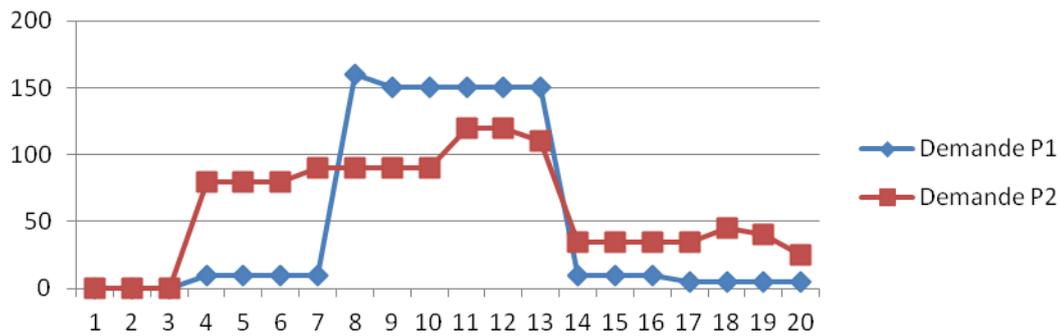


Figure V-10 Profil 3 de la demande détaillée

## 5.2 Description du déroulement de l'expérimentation

Nous utilisons dans cette expérimentation les trois types de plans de guidage que nous avons spécifiés au quatrième chapitre PG1, PG2 et PG3. Nous rappelons que PG1 s'appuie sur le coût de production interne agrégé CPI, PG2 s'appuie sur le coût de production agrégé CP et PG3 s'appuie sur la sous-traitance agrégée.

L'expérimentation que nous réalisons, comporte trois familles de simulation comme l'illustre la figure V-11.

Pour une famille de simulation, nous fixons le profil de la demande détaillée et nous faisons varier le type de plan de guidage parmi les trois plans fixés PG1, PG2 et PG3. Ainsi, chaque famille de simulation fournit le comportement de notre structure décisionnelle selon les trois plans de guidage pour le profil de demande détaillée spécifié. La comparaison entre les résultats se fait avec des indicateurs globalisés que nous choisissons parmi les indicateurs de performance déjà présentés au début de ce chapitre. Les résultats numériques sont présentés dans le paragraphe suivant.

## 5.3 Résultats de l'expérimentation

Les résultats de chaque famille de simulation sont regroupés dans un tableau spécifique. Ainsi, les tableaux V-13, V-14 et V-15 correspondent respectivement aux résultats de la première, de la deuxième et de la troisième famille de simulation. Ces tableaux affichent les résultats globalisés par macro-période et sur la totalité de l'horizon agrégé. Nous rappelons aussi dans le tableau V-12 les caractéristiques du plan agrégé que nous utilisons pour déterminer les différents indicateurs de performance.

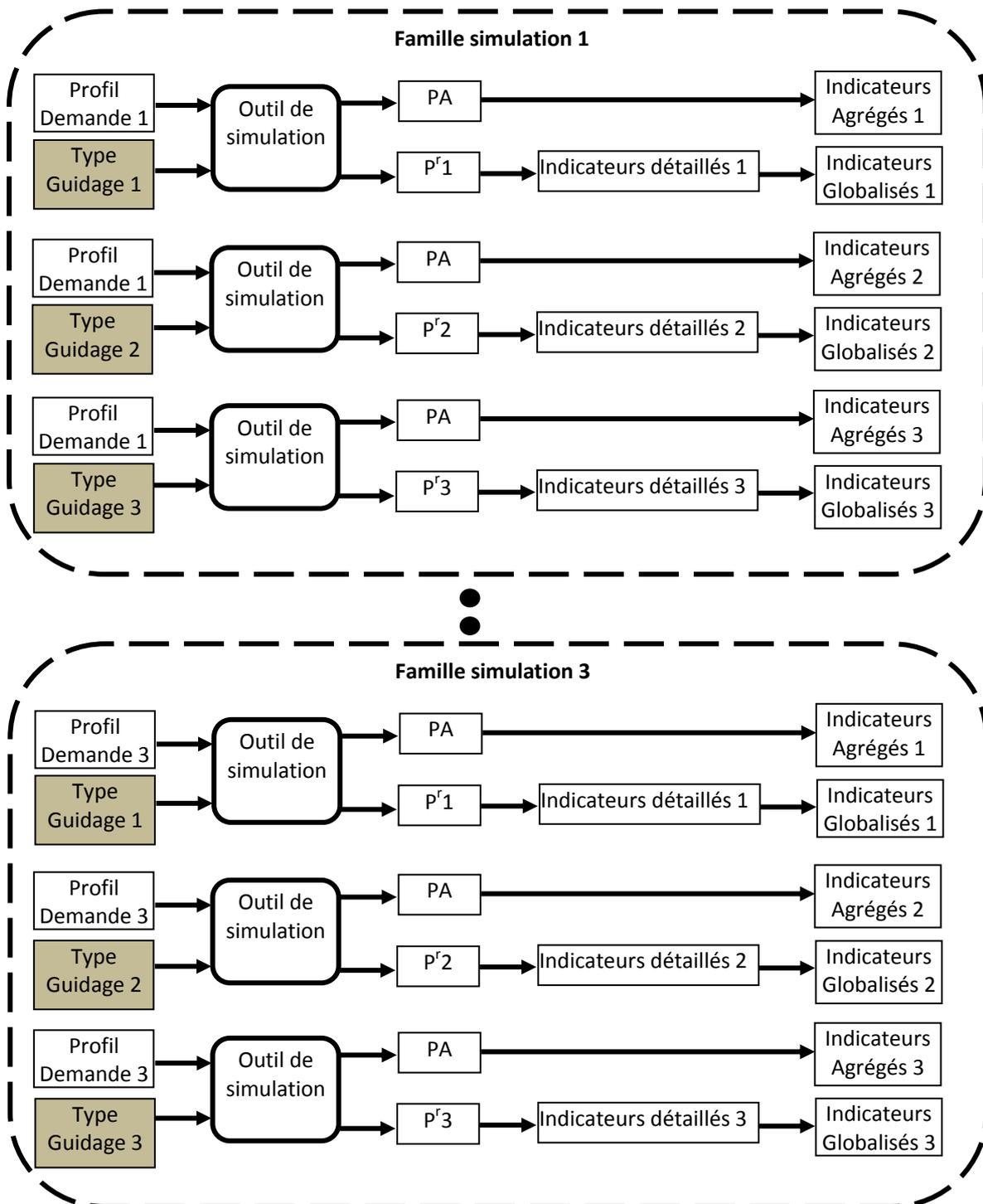


Figure V-11 Description du déroulement de l'expérimentation dans le cas d'une demande agrégée certaine

Macro-périodes	t1	t2
Coût total agrégé CO	12 619	7 148
	<b>19 767</b>	
Coût de production agrégé CP	12 619	7 148
	<b>19 767</b>	
Coût de production interne agrégé CPI	12 619	7 148
	<b>19 767</b>	
Sous-traitance agrégée ST	403	8
	<b>411</b>	
Taux Service agrégé TS	100%	100%
	<b>100%</b>	

Tableau V-12 Caractéristiques du plan agrégé

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé <u>CO</u>	21 700	2 520	12 619	180 605	12 819	170 271	21 135	193 615
	<b>24 220</b>		<b>193 224</b>		<b>183 090</b>		<b>214 750</b>	
Coût de <u>production</u> globalisé <u>CP</u>	21 500	2 520	12 419	7 149	12 619	7 149	13 855	5 228
	<b>24 020</b>		<b>19 568</b>		<b>19 768</b>		<b>19 083</b>	
Coût de <u>production</u> interne globalisé <u>CPI</u>	21 700	2 520	12 619	7 149	12 819	7 149	14 135	5 228
	<b>24 220</b>		<b>19 768</b>		<b>19 968</b>		<b>19 363</b>	
Sous-traitance globalisée <u>ST</u>	800	0	334	170	345	169	403	8
	<b>800</b>		<b>504</b>		<b>514</b>		<b>411</b>	
TAUX <u>SERVICE</u> globalisé <u>TS</u>	100%	100%	100%	37,30%	100%	39,27%	97,67	49,17
	<b>100%</b>		<b>68,65%</b>		<b>69,64%</b>		<b>73,4%</b>	

Tableau V-13 Caractéristiques du plan réel pour le profil 1 de demande

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé <u>CO</u>	12 530	10 920	13 967	27 600	13 237	10 494	15 445	10 039
	<b>23 450</b>		<b>41 567</b>		<b>23 731</b>		<b>25 484</b>	
Coût de production globalisé <u>CP</u>	11 350	9 110	11 439	4 810	12 057	7 148	13 905	5 055
	<b>20 460</b>		<b>16 249</b>		<b>19 205</b>		<b>18 960</b>	
Coût de production interne globalisé <u>CPI</u>	12 530	10 920	12 619	7 148	13 237	10 494	15 445	10 039
	<b>23 450</b>		<b>19 767</b>		<b>23 731</b>		<b>25 484</b>	
Sous-traitance globalisée <u>ST</u>	300	220	287	0	300	122	392	8
	<b>520</b>		<b>287</b>		<b>422</b>		<b>400</b>	
TAUX SERVICE globalisé <u>TS</u>	100%	100%	99,25%	88,33%	100%	100%	100%	100%
	<b>100%</b>		<b>93,79%</b>		<b>100%</b>		<b>100%</b>	

Tableau V-14 Caractéristiques du plan réel pour le profil 2 de demande

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé <u>CO</u>	22 480	2 720	14 424	230 636	13 799	170 271	15 395	193 615
	<b>25 200</b>		<b>245 060</b>		<b>184 070</b>		<b>209 010</b>	
Coût de production globalisé <u>CP</u>	21 300	2 720	11 439	7 150	12 619	7 149	13 855	5 228
	<b>24 020</b>		<b>18 589</b>		<b>19 768</b>		<b>19 083</b>	
Coût de production interne globalisé <u>CPI</u>	22 480	2 720	12 619	7 150	13 799	7 149	15 395	5 228
	<b>25 200</b>		<b>19 769</b>		<b>20 948</b>		<b>20 623</b>	
Sous-traitance globalisée <u>ST</u>	800	0	282	174	345	169	403	8
	<b>800</b>		<b>456</b>		<b>514</b>		<b>411</b>	
TAUX SERVICE globalisé <u>TS</u>	100%	100%	99%	30,05%	100%	46,59%	100%	49,86%
	<b>100%</b>		<b>64,53%</b>		<b>73,3%</b>		<b>74,93%</b>	

Tableau V-15 Caractéristiques du plan réel pour le profil 3 de demande

## 5.4 Analyse des résultats

A l'examen de ces valeurs, quelques points généraux peuvent être notés :

- Dans le cadre du profil 2 (tableau V-14) les taux de service associés à l'approche hiérarchisée sont bons quel que soit le type de guidage et très proches du taux de service du plan idéal. Ceci se comprend aisément puisque dans ce profil les pics de demande sont situés en fin de macro-période et le niveau détaillé a la capacité d'anticiper ces pics. Pour les autres profils (tableaux V-13 et V-15), les taux de service obtenus par l'approche sont moins bons ce qui est logique puisque les pics ne peuvent être anticipés.
- Les coûts totaux CO, de production CP ou internes CPI sont globalement du même ordre de grandeur pour les différents types de guidage au sein d'un même profil de demande.
- Il y a une grande différence entre les coûts totaux globalisés  $\overline{\text{CO}}$  issus de l'approche hiérarchisée et le coût total globalisé du plan idéal  $\overline{\text{CO}}^{\text{ideal}}$ , particulièrement pour les profils 1 et 3. Ceci est lié au coût d'arriérés qui sont intégrés dans le coût total et qui sont importants puisque le taux de service est compris entre 65% et 75%.

Pour aller au-delà de cette première analyse, nous proposons de calculer certains indicateurs et de les regrouper dans un même tableau afin d'introduire une vue synthétique de l'expérimentation. Dans cet objectif, nous présentons les deux tableaux suivants V-16 et V-17.

Dans le premier tableau, nous nous intéressons à caractériser la réactivité de chaque plan réel en fonction du type de guidage adopté et du profil de la demande détaillée considéré. Ainsi, nous choisissons comme indicateurs le taux de service globalisé TS et l'indicateur de la qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production IQCP. Dans ce contexte, rappelons que le taux de service TS caractérise le taux de satisfaction de la demande détaillée et que l'indicateur IQCP détermine l'écart entre le coût de production du plan réel et le coût de production du plan idéal. Plus cet écart est faible, plus l'approche est réactive.

Dans le deuxième tableau, nous étudions **la robustesse** du plan réel vis-à-vis du taux de service agrégé et du coût de production agrégé en utilisant l'indicateur de robustesse IRCP. Dans ce cadre, rappelons que IRCP spécifie l'écart entre le coût de production agrégé et le coût de production détaillé globalisé.

Il est important de remarquer que les différents indicateurs utilisés dans ces deux tableaux sont présentés pour la totalité de l'horizon agrégé et non par macro-période afin de faciliter l'analyse des résultats.

		<b>P<sup>r</sup> avec guidage CPI</b>	<b>P<sup>r</sup> avec guidage CP</b>	<b>P<sup>r</sup> avec guidage ST</b>
Profil 1 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	68,65%	69,64%	73,4%
	IQCP	-19%	-18%	-21%
Profil 2 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	93,79%	100%	100%
	IQCP	-21%	-6%	-7%
Profil 3 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	64,53%	73,3%	74,93%
	IQCP	-23%	-18%	-21%
<b>MOYENNE de <math>\overline{\text{TS}}</math> pour les 3 profils</b>		<b>75,65%</b>	<b>80,98%</b>	<b>82,77%</b>
<b>MOYENNE de IQCP pour les 3 profils</b>		<b>-21%</b>	<b>-14%</b>	<b>-16%</b>

Tableau V-16 Analyse de la qualité de la réactivité du plan réel selon le type de guidage et le profil de la demande détaillée

A partir du tableau V-16, nous établissons les constatations suivantes :

- a) Pour tout profil de demande détaillée, le plan réel obtenu par le guidage PG3(ST) réalise le meilleur taux de service. On peut en conclure que pour cette expérimentation le guidage par sous-traitance ST est le plus efficace. Par contre, le plan réel obtenu par le guidage PG1(CPI) réalise un plus mauvais taux de service.
- b) Les indicateurs IQCP sont négatifs ce qui signifie que le coût de production associé à l'approche hiérarchisée est plus faible que celui du plan idéal. Rappelons que ce coût est directement lié aux quantités produites (en interne ou en sous-traitance). La présence d'arriérés dans l'approche hiérarchisée implique une production moindre que dans le plan idéal et donc un coût de production systématiquement inférieur.

Nous pouvons conclure que, dans cette expérimentation, le guidage PG3 permet d'obtenir le plan le plus réactif. Ainsi, ce type de guidage offre la plus grande autonomie au niveau inférieur pour faire face aux différentes matérialisations de la demande agrégée sous forme de profil de demande détaillée.

Autre point important, nous constatons que pour n'importe quel type de guidage, la meilleure réactivité (taux de service et IQCP) est atteinte au niveau du deuxième profil de la demande. Ceci est l'effet de la prise en compte des différents délais temporels au niveau détaillé. Ainsi, comme les deux pics de la demande de P1 sont calés vers la fin de chaque macro-période, le système de production a suffisamment de temps pour anticiper les deux

pics et les absorber. Cette situation est inversée dans le cas du premier profil où les deux pics sont au début de chaque macro-période. Ceci explique encore le fait que chaque guidage affiche la moins bonne réactivité pour ce premier profil.

		<b>Pr avec guidage CPI</b>	<b>Pr avec guidage CP</b>	<b>Pr avec guidage ST</b>
Profil 1 Demande Détaillée	<b>TS</b>	68,65%	69,64%	73,4%
	<b>IRCP</b>	-1%	0%	-3%
Profil 2 Demande Détaillée	<b>TS</b>	93,79%	100%	100%
	<b>IRCP</b>	-18%	-3%	-4%
Profil 3 Demande Détaillée	<b>TS</b>	64,53%	73,3%	74,93%
	<b>IRCP</b>	-6%	0%	-3%
<b>MOYENNE de TS pour les 3 profils</b>		<b>75,65%</b>	<b>80,98%</b>	<b>82,77%</b>
<b>MOYENNE de IRCP pour les 3 profils</b>		<b>-8%</b>	<b>-1%</b>	<b>-4%</b>

**Tableau V-17 Analyse de la robustesse du plan réel par rapport à la qualité de service et au coût de production agrégés**

En ce qui concerne la robustesse vis-à-vis du taux de service agrégé et du coût de production agrégé (tableau V-17), nous constatons les points suivants :

Pour n'importe quel profil de la demande détaillée, le plan réel obtenu par le guidage PG3(ST) offre la plus grande robustesse par rapport au taux de service agrégé (100% de taux de service agrégé), alors que le guidage CPI offre la plus mauvaise robustesse par rapport à ce taux.

Dans toutes les expérimentations, la robustesse du coût de production est assurée puisque IRCP est négatif. Le coût de production associé au plan réel est plus faible que celui du plan agrégé. Ceci s'applique d'une part parce que le volume de production détaillé est moindre que le volume agrégé (présence d'arriérés) et que d'autre part dans les guidages PG1 et PG2 la contrainte de désagrégation introduite dans le modèle détaillé limite le coût détaillé.

Dans ce contexte, le guidage PG3 basé sur la sous-traitance et non sur les coûts conserve une bonne robustesse vis-à-vis des coûts agrégés. Il fournit également le meilleur taux de service.

Ainsi, le plan réel obtenu par le plan de guidage PG3 basé sur la sous-traitance est le plus réactif puisqu'il conduit à un meilleur taux de service. Economiquement, il est plus compétitif que les deux autres plans car en moyenne il atteint ce niveau de réactivité avec un coût de production qui est le plus bas. Dans le cadre de cette expérimentation avec une demande agrégée certaine, nous pourrions conclure alors que le meilleur guidage est PG3(ST).

## 6 Expérimentation avec une demande agrégée incertaine

Dans le cadre de ce paragraphe, nous adoptons l'hypothèse que nous avons une demande agrégée incertaine. Cela implique que la demande agrégée n'est pas nécessairement égale à la somme des demandes détaillées associées aux périodes élémentaires composant cette macro-période.

Ainsi, nous souhaitons analyser les performances de notre structure dans un tel contexte de demande incertaine. A cette fin, nous réalisons une série d'expérimentations avec différents profils de demande détaillée.

### 6.1 Demande agrégée incertaine et profils détaillés réels

Dans le cadre de cette expérimentation, nous considérons la même demande agrégée que dans les paragraphes précédents (cf. Tableau V-18).

<b>Demande Agrégée Incertaine</b>		
	t1	t2
Demande Agrégée incertaine P1	500	500
	<b>1000</b>	
Demande Agrégée incertaine P2	600	600
	<b>1200</b>	
<b>Agrégation de demande détaillée réelle</b>		
	t1	t2
Demande Agrégée Réelle P1	586	556
	<b>1142</b>	
Demande Agrégée Réelle P2	480	509
	<b>989</b>	

Tableau V-18 Demande agrégée réelle et Demande agrégée incertaine

Cette demande agrégée est incertaine car elle ne correspond plus à l'agrégation des demandes détaillées. Il convient de souligner que, quels que soient les profils de demandes détaillées, leur agrégation conduit aux mêmes valeurs de demandes agrégées réelles par macro-période (cf. Tableau V-18).

Dans le cadre de cette expérimentation, la demande agrégée réelle est inférieure à la demande agrégée incertaine. Cette demande agrégée réelle est matérialisée par différents profils réels de demande détaillée. Avec le même principe que celui considéré dans l'expérimentation précédente, nous adoptons un pic de la demande de P1 à chaque macro-période. Ces deux pics vont changer de positionnement pour chaque profil réel de demande détaillée. Les tableaux V-19, V-20 et V-21 détaillent les trois profils réels considérés dans cette expérimentation.

**Profil 1 : Pic de la demande calé vers le début des périodes agrégées.**

Dans ce premier profil, nous adoptons deux pics sur la demande du produit P1 qui se produisent au début de chaque macro-période.

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	190	175	175	12	12	12	10
Demande détaillée P2	0	0	0	64	64	64	72	72	72	72
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	160	165	175	11	11	12	6	6	5	5
Demande détaillée P2	96	96	88	28	28	30	30	38	45	30

Tableau V-19 Profil 1 de demande détaillée réelle

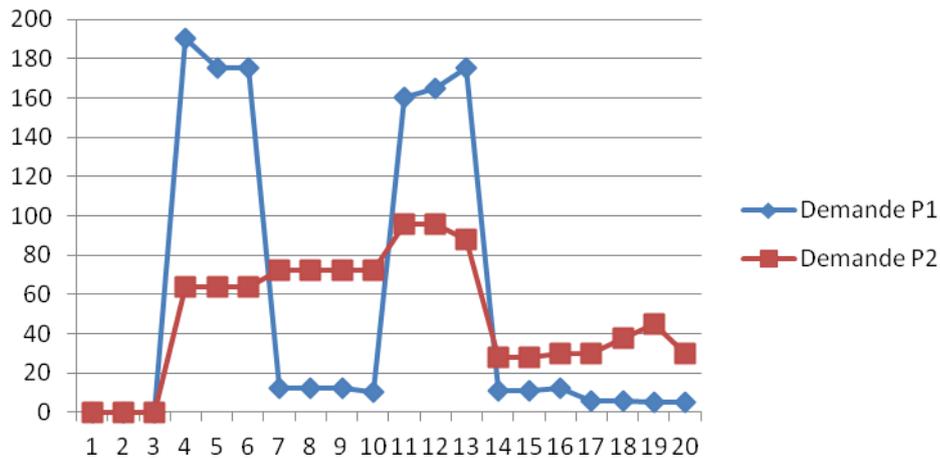


Figure V-12 Profil 1 de la demande détaillée

**Profil 2 : Pic de la demande calée vers la fin des périodes agrégées.**

Dans ce deuxième profil, les deux pics sur la demande du produit P1 se positionnent à la fin de chaque macro-période.

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	12	12	12	10	190	175	175
Demande détaillée P2	0	0	0	64	64	64	72	72	72	72
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	11	11	12	6	6	5	5	160	165	175
Demande détaillée P2	28	28	30	30	38	45	30	96	96	88

Tableau V-20 Profil 2 de demande détaillée réelle

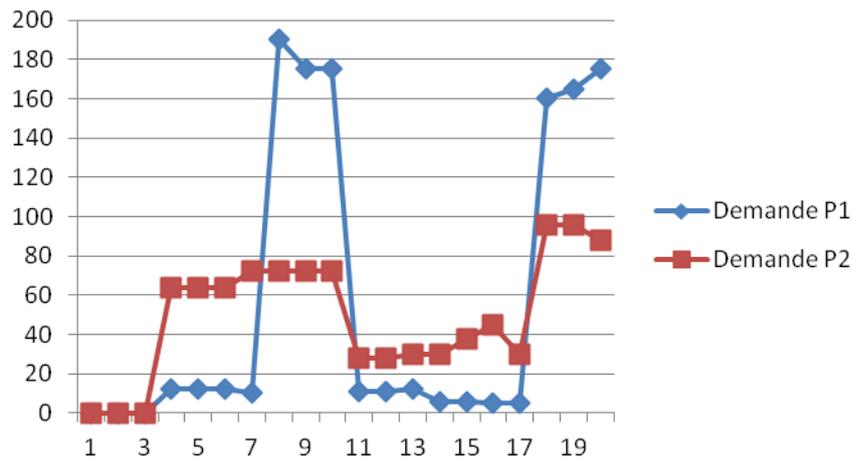


Figure V-13 Profil 2 de la demande détaillée

**Profil 3 : Pic de la demande en cloche**

Dans ce troisième profil, le premier pic se place à la fin de la première macro-période et le deuxième pic est au début de la deuxième macro-période.

Macro-période	t1									
Périodes élémentaires	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\tau_8$	$\tau_9$	$\tau_{10}$
Demande détaillée P1	0	0	0	12	12	12	10	190	175	175
Demande détaillée P2	0	0	0	64	64	64	72	72	72	72
Macro-période	t2									
Périodes élémentaires	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$	$\tau_{19}$	$\tau_{20}$
Demande détaillée P1	160	165	175	11	11	12	6	6	5	5
Demande détaillée P2	96	96	88	28	28	30	30	38	45	30

Tableau V-21 Profil 3 de demande détaillée réelle

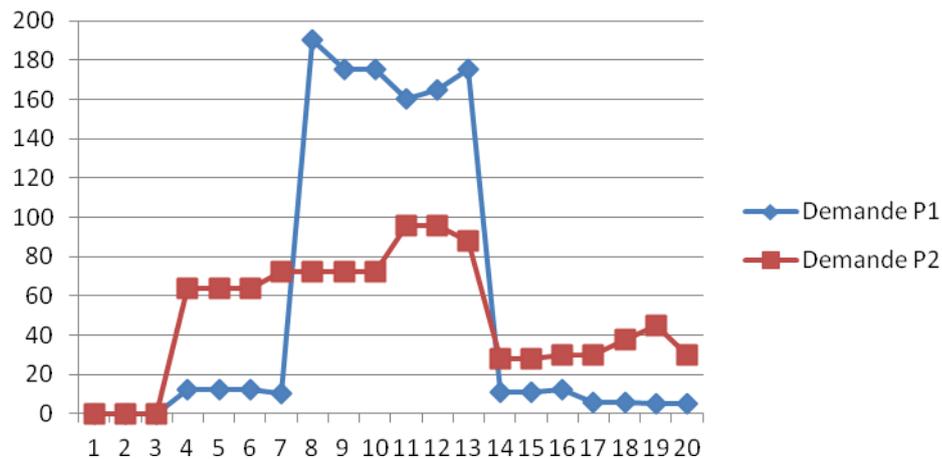


Figure V-14 Profil 3 de la demande détaillée

## 6.2 Résultats de l'expérimentation

Comme pour l'expérimentation précédente, nous présentons dans ce paragraphe les résultats des trois familles de simulations réalisées dans le cadre d'une demande agrégée incertaine. Les tableaux V-22, V-23 et V-24 détaillent respectivement les résultats pour les profils réels 1, 2 et 3.

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé $\overline{CO}$	20 496	2 579	17 419	114 410	13 143	102 987	39 635	136 582
	<b>23 075</b>		<b>131 829</b>		<b>116 130</b>		<b>176 217</b>	
Coût de production globalisé $\overline{CP}$	19 972	2 579	12 319	7 148	12 619	7 149	13 602	4 694
	<b>22 551</b>		<b>19 467</b>		<b>19 768</b>		<b>18 296</b>	
Coût de production interne globalisé $\overline{CPI}$	20 496	2 579	12 619	7 148	13 143	7 149	13 935	4 694
	<b>23 075</b>		19 767		20 292		18 629	
Sous-traitance globalisée $\overline{ST}$	746	0	341	182	356	190	403	8
	<b>746</b>		<b>523</b>		<b>546</b>		<b>411</b>	
TAUX SERVICE globalisé $\overline{TS}$	100%	100%	97,97%	57,91%	100%	64,91%	93,4%	64,43%
	<b>100%</b>		<b>77,94%</b>		<b>82,46%</b>		<b>78,92%</b>	

Tableau V-22 Résultats numériques pour le Profil réel 1

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé $\overline{\overline{CO}}$	11 924	10 454	12 619	21 963	12 412	10 145	14 296	9 871
	<b>22 378</b>		<b>34 582</b>		<b>22 557</b>		<b>24 167</b>	
Coût de production globalisé $\overline{\overline{CP}}$	10 520	8 542	11 183	4 686	11 008	7 148	12 278	5 018
	<b>19 062</b>		<b>15 869</b>		<b>18 156</b>		<b>17 296</b>	
Coût de production interne globalisé $\overline{\overline{CPI}}$	11 924	10 454	12 619	7 148	12 412	10 145	14 296	9 871
	<b>22 378</b>		<b>19 767</b>		<b>22 557</b>		<b>24 167</b>	
Sous-traitance globalisée $\overline{\overline{ST}}$	276	197	276	15	276	127	323	8
	<b>473</b>		<b>291</b>		<b>403</b>		<b>331</b>	
TAUX SERVICE globalisé $\overline{\overline{TS}}$	100%	100%	100%	95,2011	100%	100%	100%	100%
	<b>100%</b>		<b>96,64%</b>		<b>100%</b>		<b>100%</b>	

Tableau V-23 Résultats numériques pour le Profil réel 2

	Plan Idéal		Pr avec guidage CPI		Pr avec guidage CP		Pr avec guidage ST	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Macro-périodes								
Coût Total globalisé $\overline{\overline{CO}}$	21 662	2 403	12 619	169 655	14 143	102 987	16 008	136 558
	<b>24 065</b>		<b>182 274</b>		<b>117 130</b>		<b>152 566</b>	
Coût de production globalisé $\overline{\overline{CP}}$	20 258	2 403	11 215	7 149	12 619	7 216	13 626	4 670
	<b>22 661</b>		<b>18 364</b>		<b>19 835</b>		<b>18 296</b>	
Coût de production interne globalisé $\overline{\overline{CPI}}$	21 662	2 403	12 619	7 149	14 143	7 216	16 008	4 670
	<b>24 065</b>		<b>19 768</b>		<b>21 359</b>		<b>20 678</b>	
Sous-traitance globalisée $\overline{\overline{ST}}$	756	0	285	193	356	190	403	8
	<b>756</b>		<b>478</b>		<b>546</b>		<b>411</b>	
TAUX SERVICE globalisé $\overline{\overline{TS}}$	100%	100%	100%	39,69%	100%	62,29%	100%	60,6%
	<b>100%</b>		<b>69,85%</b>		<b>81,15%</b>		<b>80,3%</b>	

Tableau V-24 Résultats numériques selon le Profil réel 3

Nous retrouvons les mêmes éléments que dans l'expérimentation précédente.

- Disparité importante entre les coûts totaux issus de l'approche hiérarchisée et le coût total du plan idéal liée à la présence d'arriérés.
- Coûts de production et coûts de production interne du même ordre de grandeur pour un même profil et des guidages différents.
- Des taux de service allant de 69,85%(pire des cas) à 100% (cas le plus favorable) ce qui montre l'intérêt de l'approche hiérarchisée.

### 6.3 Analyse des résultats

Afin de faciliter l'analyser des résultats présentés dans le paragraphe précédent, nous proposons de donner une vue synthétique avec les tableaux V-25 et V-26.

		Pr avec guidage CPI	Pr avec guidage CP	Pr avec guidage ST
Profil 1 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	77,94%	82,46%	78,92%
	IQCP	-14%	-12%	-19%
Profil 2 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	96,64%	100%	100%
	IQCP	-17%	-5%	-9%
Profil 3 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	69,85%	81,15%	80,3%
	IQCP	-19%	-12%	-19%
<b>MOYENNE de <math>\overline{\text{TS}}</math> pour les 3 profils</b>		<b>81,48%</b>	<b>87,87%</b>	<b>86,41%</b>
<b>MOYENNE de IQCP pour les 3 profils</b>		<b>-16%</b>	<b>-10%</b>	<b>-16%</b>

**Tableau V-25 Analyse de la qualité de la réactivité du plan réel selon le type de guidage et le profil de la demande détaillée**

A partir du tableau V-25, nous établissons les constatations suivantes :

- a) Pour tout profil de demande détaillée, le plan réel obtenu par le guidage PG2 réalise le meilleur taux de service. Comme précédent et pour les mêmes raisons le plan réel obtenu par le guidage CPI réalise le moins bon taux de service. Toutefois, en moyenne, le plan réel obtenu par le guidage PG2 à un meilleur taux de service que celui du plan réel obtenu par le guidage PG3..

- b) De même, avec le guidage PG2 on obtient, quel que soit le profil de demande détaillée, le coût de production le plus proche du coût de production idéal. Ce coût est moins cher que le coût de production idéal.

Sur ces deux points, il est nettement clair que Pr(CP) est le plus réactif, aussi bien au niveau du taux de service qu'au niveau de la qualité de réactivité vis-à-vis du coût de production idéal.

Dans le cadre de cette expérimentation, nous constatons que pour n'importe quel type de guidage, la meilleure réactivité (taux de service et IQCP) est atteinte au niveau du deuxième profil de la demande. En revanche la moins bonne réactivité est lue pour le premier profil. Ceci confirme bien encore l'effet de la prise en compte des différents délais temporels au niveau détaillé. Ainsi, comme les deux pics de la demande de P1 sont calés vers la fin de chaque macro-période, alors, le système de production a suffisamment du temps pour anticiper les deux pics et les absorber. Alors que c'est tout à fait le contraire avec le premier profil où les deux pics sont calés au début de chaque macro-période.

		Pr avec guidage CPI	Pr avec guidage CP	Pr avec guidage ST
Profil 1 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	77,94%	82,46%	78,92%
	IRCP	-2%	0%	-7%
Profil 2 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	96,64%	100%	100%
	IRCP	-20%	-8%	-13%
Profil 3 Demande Détaillée	$\overline{\text{TS}}$	69,85%	81,15%	80,3%
	IRCP	-7%	0%	-7%
<b>MOYENNE de <math>\overline{\text{TS}}</math> pour les 3 profils</b>		<b>81,48%</b>	<b>87,87%</b>	<b>86,41%</b>
<b>MOYENNE de IRCP pour les 3 profils</b>		<b>-9%</b>	<b>-3%</b>	<b>-9%</b>

Tableau V-26 Analyse de la robustesse du plan réel par rapport à la qualité de service et au coût de production agrégés

En ce qui concerne la robustesse vis-à-vis du taux de service agrégé et au coût de production agrégé (tableau V-16), nous constatons les points suivants :

Pour n'importe quel profil de la demande détaillée, le plan réel obtenu par le guidage CP offre la plus grande robustesse vis-à-vis du taux de service agrégé et vis-à-vis du coût de production agrégé.

Dans cette expérimentation, le plan réel obtenu avec le guidage CP se distingue nettement des deux autres plans. En effet, il permet d'avoir le meilleur taux de service, tout en maintenant une robustesse presque parfaite vis-à-vis du coût de production agrégé et une robustesse très bonne vis-à-vis du taux de service agrégé.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la performance de notre structure décisionnelle en termes de réactivité et de robustesse en nous appuyant sur des simulations.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons présenté l'outil informatique qui permet de simuler le fonctionnement de notre structure. Cet outil présente l'avantage d'être flexible en permettant de réaliser différents types de simulation en faisant varier les paramètres d'entrée tels que le modèle agrégé, le type de guidage, le profil de la demande détaillée, etc.

Dans un second temps, nous avons étudié comment caractériser la performance de notre structure. Dans ce cadre, nous avons élaboré un ensemble d'indicateurs de performance. Ces indicateurs ont été divisés en deux catégories. La première catégorie regroupe les indicateurs agrégés qui caractérisent le plan agrégé établi au niveau supérieur. La deuxième catégorie concerne les indicateurs « globalisés » qui caractérisent le plan réel détaillé. A l'aide des indicateurs agrégés et globalisés nous avons pu mesurer la qualité de la réactivité vis-à-vis du plan idéal et la robustesse du plan agrégé de notre approche.

Dans un troisième temps, nous avons effectué différentes expérimentations sur un problème académique afin de pouvoir analyser facilement les résultats.

La première série met en évidence la qualité du modèle agrégé avec les contraintes d'encours définies au chapitre précédent.

Les deux dernières expérimentations portent essentiellement sur les types de guidage et les profils de demandes détaillées dans deux contextes différents de demande agrégée certaine et incertaine.

Les guidages étudiés sont plus ou moins « prescriptifs ». Le guidage PG3 est le plus contraignant car il fixe le volume de sous-traitance par produit et par macro-période. Les guidages par coûts sont plus « globaux » car ils intègrent les coûts d'un ensemble de décisions (production en interne, sous-traitance, achat composants, etc.) et non les seules décisions de sous-traitance.

Concernant les types de guidage nous pouvons conclure que, dans le cadre d'une demande agrégée certaine, le guidage PG3 (par sous-traitance) qui est plus prescriptif que les autres, donne de meilleurs résultats.

Dans le cadre d'une demande agrégée incertaine, c'est le guidage PG2 basé que le coût de production qui est le meilleur. Il procure davantage d'autonomie au niveau détaillé pour faire face aux différentes matérialisations de la demande agrégée.

Sur les aspects profils de demande détaillée, nous percevons les limites de la notion d'agrégation temporelle lorsque les pics de demandes détaillées se situent en début de macro-période (le pire des cas). Par ailleurs, nous notons que les performances de l'approche sont bonnes lorsque les pics sont positionnés en de fin de macro-période. Dans ce cadre, nous remarquons encore que les indicateurs de performance conservent des valeurs raisonnables même dans le pire des cas.

## Conclusion générale

Avec la complexification des interactions de chaque nœud d'une chaîne logistique avec ses partenaires immédiats, conséquence de la tendance à l'accentuation du recentrage métier dans la recherche d'une compétitivité maximale, la décentralisation de la gestion industrielle pour la responsabilisation de chaque nœud paraît la voie la plus rationnelle. L'incertitude de l'environnement économique appelle aussi à partager les risques, mais dans une coopération saine qui préserve les intérêts globaux de l'ensemble. Dans ce contexte, et pour atténuer la complexité de la décision au niveau de chaque nœud, le recours à la hiérarchisation de la décision est incontournable. Cette hiérarchisation est d'autant plus efficace quand elle permet de sérier les problèmes de l'optimisation à travers les niveaux successifs tout en veillant, à chaque niveau, à conserver le maximum de marge de manœuvre pour le niveau suivant.

C'est ce constat global qui a inspiré les travaux de cette thèse. Nous avons choisi d'étudier la problématique posée en la cernant au sein d'une structure générique qui constitue un maillon représentatif de la structure globale d'une chaîne logistique. Ensuite, nous nous sommes focalisés sur l'étude d'une approche de planification tactique des activités de l'entité centrale de cette structure générique, à savoir l'entité de production.

D'une façon générale pour chaque nœud d'une chaîne logistique, le souci de la planification porte principalement sur, d'une part, la minimisation maximum des coûts et, d'autre part, l'aménagement de moyens de réactivité pour faire face aux incertitudes de la demande et aux aléas du système de production. La compétitivité et la réputation de la qualité de service en dépendent grandement. Tenant compte de cela, nous avons orienté nos travaux vers la définition d'une approche de planification hiérarchisée à deux niveaux, en liant le premier niveau à la notion d'agrégation qui permet d'optimiser les coûts globaux de la production et en laissant au deuxième niveau la préoccupation de gérer un processus dynamique de planification à horizon glissant, façon la plus appropriée pour satisfaire les besoins en réactivité et en robustesse.

Dans cette approche, l'articulation entre les deux niveaux décisionnels est assurée par un « plan de guidage ». Ce plan de guidage renferme des grandeurs agrégées par macro-périodes d'activité, extraites du plan de production agrégé et transmises au niveau détaillé sous la forme de consignes à suivre au mieux.

Nous avons adopté une démarche progressive pour la spécification, la modélisation et l'expérimentation de notre approche :

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au niveau détaillé. Une analyse fine du processus décisionnel nous a amené à distinguer deux phases différentes par lesquelles passe la concrétisation de toute décision, quel qu'en soit le type : la phase d'anticipation de la décision et la phase de réalisation de la décision. Ces deux phases organisent la dynamique des activités de l'entité considérée via les délais qu'elles imposent et impactent, en conséquence, sur le processus de planification. Nous avons montré comment, dans cette vision, on peut traduire la prise en compte de l'incertitude de la demande et des aléas de

l'environnement et de la production de façon générale. En s'appuyant sur cette vision, nous avons proposé une modélisation originale du processus décisionnel qui prend en compte cette distinction entre les deux phases, en étant axée sur trois variables de volume pour chaque décision  $e$  ( $b_e$  : volume au début de la phase d'anticipation,  $m_e$  : volume au début de la phase de réalisation et  $q_e$  : volume à la fin de la phase de réalisation). Ces valeurs sont celles prévues par la décision. Les perturbations lors de l'exécution effective de la décision transforment ces valeurs respectivement en  $\overline{b_e}$ ,  $\overline{m_e}$  et  $\overline{q_e}$ . Ainsi, l'écart entre la valeur prévue et la valeur constatée lors de la réalisation conduit à lancer une action corrective. Le modèle mathématique décrivant ce processus décisionnel détaillé est mis sous forme d'un programme linéaire et est traduit, pour son exécution, en un programme logiciel de simulation utilisant le langage Java et les bibliothèques d'optimisation et de modélisation du solveur Cplex.

Une expérimentation de ce modèle a été effectuée sur un problème académique, pour une combinaison donnée des délais d'anticipation et de réalisation et des coûts. Ses résultats ont montré deux points. D'une part, plus on peut avoir de l'avance dans la connaissance de la demande réelle plus on peut atteindre le meilleur taux de service. D'autre part, tout retard dans la réaction à l'incertitude et aux aléas, dû au mécanisme du gel des décisions, conduit à amoindrir les performances aussi bien sur le taux de service que sur les coûts. D'où les avantages apportés par notre approche, consistant à réduire les gels et à favoriser une réactivité aussi rapide que possible. Nous envisageons, en prolongement de ce travail, d'étudier plus finement, par un ensemble de séries de simulations, l'impact des variations de chacun des différents paramètres (coûts, délais, horizon ferme, horizon gelé, périodicité de planification) sur le rendement de la planification.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au niveau agrégé. Ce niveau effectue une planification agrégée qui se base sur une agrégation temporelle du problème de planification considéré. La modélisation de la planification agrégée reprend le formalisme adopté au niveau détaillé qui consiste à associer 3 variables à chaque type de décision. Dans ce cadre, deux formalisations ont été développées pour établir les relations entre ces trois familles de variables.

- La première formalisation ignore les délais d'anticipation et de réalisation introduits au niveau détaillé et conduit à un modèle agrégé qualifié de classique.
- La deuxième formalisation prend en compte ces délais au niveau supérieur sous une forme agrégée et nous conduit à introduire la notion d'en-cours agrégée. Ainsi, nous présentons un modèle agrégé original comportant ces contraintes d'en-cours.

Pour le couplage avec le niveau détaillé, nous avons proposé trois types de guidage. Les deux premiers assurent des guidages budgétaires. Le troisième effectue un guidage par sous-traitance. Pour ces trois types de guidages, nous avons montré comment intégrer les contraintes additionnelles au niveau du modèle décisionnel détaillé pour permettre à celui-ci de suivre le guidage considéré.

Enfin, pour étudier la performance de notre structure décisionnelle en termes de réactivité et de robustesse, nous avons eu recours à la simulation numérique. Nous avons ainsi développé un outil informatique permettant de simuler la structure décisionnelle hiérarchisée et un jeu d'indicateurs pour comparer les différents résultats. Nous avons effectué trois séries d'expérimentations sur la base d'un même problème académique.

La première série vise à situer la qualité du modèle agrégé avec les contraintes d'en-cours par rapport au modèle agrégé classique. Ses résultats ont permis de montrer que :

- le modèle agrégé avec contraintes d'en-cours conduit à un bien meilleur taux de service que le modèle agrégé classique,
- le modèle agrégé avec contraintes d'en-cours est beaucoup plus robuste vis-à-vis du coût total agrégé que le modèle agrégé classique.

Les deux dernières séries d'expérimentations concernent l'étude de notre approche en fonction des types de guidage et des profils de demandes détaillées dans le cas d'une demande agrégée certaine et dans le cas d'une demande agrégée incertaine. Sur un plan général, nous pouvons souligner que notre approche maintient des taux de service dans une fourchette comprise entre 65% et 100% malgré une incertitude importante de la demande. Les plans de guidage permettent d'assurer une bonne tenue des éléments budgétaires prévus au niveau agrégé. Toutefois, il apparaît que l'on doit adapter le type de guidage au contexte. En effet, dans le cadre d'une demande agrégée certaine, le guidage par sous-traitance (plus prescriptif) donne de meilleurs résultats. Dans le cadre d'une demande agrégée incertaine, c'est le guidage basé sur le coût de production qui est meilleur. Il procure davantage d'autonomie au niveau détaillé pour faire face aux différentes matérialisations de la demande agrégée.

Sur les aspects profils de demande détaillée, nous avons établi une relation entre le positionnement des pics à l'intérieur des macro-périodes et les limites de l'agrégation temporelle. Ainsi, nous pouvons distinguer le pire des cas (lorsque les pics de demandes détaillées se positionnent en début de macro-période) du meilleur des cas (lorsque les pics de demandes détaillées se positionnent en fin de macro-période). Dans ce cadre, nous remarquons que les indicateurs de performance conservent des valeurs raisonnables même dans le pire des cas.

Différentes perspectives se dégagent de ces travaux. Elles peuvent être regroupées en deux catégories.

- 1) La première catégorie est d'ordre « technique ». Elle concerne essentiellement l'outil de simulation développé. Il manque à cet outil des modules de génération automatique des jeux de données et de sauvegarde et traitement des résultats numérique. Actuellement, ces deux tâches sont effectuées d'une manière « semi-manuelle ». Ces améliorations permettront de réaliser un nombre important de simulations sur la base de problèmes générés automatiquement, ce qui nous aidera à mieux caractériser les performances de notre approche.
- 2) La deuxième catégorie est d'ordre « méthodologique ». Dans ce contexte, nous projetons deux futurs axes.
  - Le premier axe concerne la simulation du niveau détaillé dans un environnement incertain et perturbé. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas réalisé d'expérimentations intégrant des perturbations sur les décisions planifiées bien que les modèles et les outils développés le permettent. Il serait intéressant de caractériser les performances de notre approche dans un tel cadre qui reflète mieux la réalité industrielle.
  - le deuxième axe serait d'avoir de l'incertitude sur les délais qui lient le maillon générique avec ses fournisseurs et son sous-traitant. Ceci paraît un champ de recherche important qui vise l'étude des incertitudes qui touchent les relations

interentreprises dans une chaîne logistique. Dans un tel champ, des éléments de problématique tels que l'exploitation de négociations entre partenaires ou l'évaluation des stratégies de coopération en ayant recours à la théorie des jeux sont des orientations de recherche prometteuses.

## Bibliographie

- [Amrani-Zouggar, 09] Amrani-Zouggar A., Impact des contrats d'approvisionnement sur la performance de la chaîne logistique : Modélisation et simulation. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 2009.
- [Anthony, 65] Anthony R. N., Planning and Control Systems : A framework for analysis, Harvard University, Graduate School of Business Administration, Cambridge, Massachussets, 1965.
- [Archimède et al., 03] Archimède, B., Charbonnaud, P. and Mercier, N., Robustness evaluation of multisite distributed schedule with perturbed virtual jobshops. *Production Planning & Control*, 14(1), 55—67, 2003.
- [Baglin et al., 96] Baglin G., Bruel O., Garreau A., Greif M. et Van Delft C., Management industriel et logistique. Édition Economica, Collection Gestion, 2<sup>ème</sup> édition, Paris, 1996.
- [Bai et al., 97] Bai D., Carpenter T., Mulvey J.M., Making a case for robust optimization methods, *Management Science*, 43(7), p.895-907, 1997.
- [Baillet, 94] Baillet P., Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en œuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision. Thèse de Doctorat, Université Aix, Marseille III, 1994.
- [Bartezzaghi et al., 95] Bartezzaghi, E. et Verganti, R., Managing demand uncertainty through order overplanning. *International Journal of Production Economics*, No. 40, 107-120, 1995.
- [Beamon, 98] Beamon B. M., Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics*, (55), 281--294, 1998.
- [Bel et al 96] Bel G., Rota K. et Thierry C., Constraint optimisation as a tool for business process re-engineering . *International workshop on modelling techniques, business process and bechmarking (Séminaire international : Modélisation, Business Process et Benchmarking)*, Bordeaux (Laboratoire d'Automatique et de Productique Université Bordeaux 1), France, Avril 1996.
- [Berrah, 97] Berrah L., Une approche d'évaluation de la performance industrielle, modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif, Thèse de doctorat de l'INPG Grenoble, 1997.
- [Bertallanffy, 68] Bertallanffy L. *General System Theory*. George Braziller, 1968.
- [Bertsimas et al., 04] Bertsimas D. and Sim M., The Price of Robustness, *Operations Research*; 52: 35 – 53, January-February 2004.
- [Biteau et al., 91] Biteau R., Garreau A., Gavaud M., Dictionnaire des termes de gestion industrielle, Editions AFGI, 1991.
- [Bonnefous, 01] Bonnefous C., La construction d'un système d'indicateurs pertinents et efficace, dans *Indicateurs de performance sous la direction de Chantal Bonnefous et Alain Courtois*, Productique-Hermes, Paris, 2001.
- [Bougaret, 02] Bougaret S., Prise en compte de l'incertitude dans la valorisation des projets de recherche et de développement : la valeur de l'information nouvelle, Thèse de doctorat, Ecole des mines d'Albi-Carmaux, 2002.

- [Bouquin, 04] Bouquin H., Le contrôle de gestion, 2ème édition, Collection Que sais je, Presses Universitaire de France, Paris, 2004.
- [Bourrières et al., 01] Bourrières J.P., Lecompte T., Deschamps J.C., et Alami R.. 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.
- [Bourrière et al., 04] Bourrière J. P., Grabot B. et Mercé C., *Pilotage des systèmes multisites de production : Outils industriels et méthodes avancées*. Rapport LAAS n° 04375, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes, Toulouse, 2004.
- [Bourrières et al., 05] Bourrières J.P., Grabot B., et Mercé C.. *Pilotage des systèmes multisite de production : outils industriels et méthodes avancées*. Techniques de l'Ingénieur, S7662, 15 pages, Septembre 2005.
- [Box, 53] Box G. E. P., Non-Normality and tests on variances, *Biometrika*, 40(3-4): 318-335, 1953.
- [Box, 88] Box,G.E.P.,. *Signal to noise ratios, Performance Criteria and Transformation*, *Technometrics*, 30, p 1-31, 1988.
- [Brennan et al.,93] Brennan, L. et Gupta, S. M., A structured analysis of material requirement planning under combined demand and supply uncertainty. *International Journal of Production Research*, No. 31 (7), 1689-1707, 1993.
- [Burlat, 01] Burlat P., *Les enjeux économiques de la maîtrise des flux*. In *Performance industrielle et gestion des flux* (J. P. Campagne, P. Burlat), Hermès Sciences Publications *Traité IC2*, Paris, 2001.
- [Cachon et al, 02] Cachon, G.P. et Fisher M., Supply chain inventory management and the value of shared information. *Management science*, 46(8), 1032—1048, 2000.
- [Caillaud et al, 01] Caillaud E., Fargier H., Galvagnon V., Grabot B., Huguet M.J., Lamothe J., Lopez P., Thierry C., Vidal T., *Réactivité en entreprise : une enquête*. Rapport LAAS-CNRS, 01387, Juillet 2001.
- [Campagne, 01] Campagne J. P., *La problématique de la maîtrise des flux*. In *Maîtrise et organisation des flux industriels* (J. P. Campagne, P. Burlat), Hermès Sciences Publications *Traité IC2*, Paris, 2001.
- [Cauvin et al., 02] Cauvin A., Baillet-Farhouat P., et Binder Z., *Structures hiérarchisées des systèmes de pilotage*, In *Fondements du pilotage des systèmes de production* (P. Pujo, J.P. Kieffer), Hermers Sciences Publications *Traité IC2*, 2002.
- [Cesarotti et al., 99] Cesarotti, V., Rossi, L. et Santoro, R., A neural network clustering model for miscellaneous components production planning, *Production Planning & Control*, VOL . 10, NO. 4, 305 – 316, 1999.
- [Chaib-Draa et al., 06] Chaib-Draa B. and Muller J.P., *MultiAgent-Based Supply Chain Management*, Springer, 2006.
- [Chan, 03] Chan F.T.S., Performance Measurement in a Supply Chain, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp.534–548, 2003.
- [Chen et al. 03a] Chen C.L., Wang B.W., Lee W.C., Multiobjective optimization for a multienterprise supply chain network. *Ind Eng Chem Res* 42(9):1879–1889, 2003.
- [Chen et al. 03b] Chen C.L., Wang B.W., Lee W.C., The optimal profit distribution problem in a multi-echelon supply chain network: a fuzzy optimization approach. In:

- Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Pt 1, Proceedings, 2773, Springer, pp 1289–1295, 2003.
- [Chetouane, 98] Chetouane F. et Binder Z., Robustesse et flexibilité dans les systèmes de production manufacturières, Actes du 1<sup>er</sup> colloque National sur la productique CNP'98, Tizi-Ouzou, Algérie, p.28-33, mai, 1998.
- [Chetouane, 99] Chetouane F., Sur la robustesse dans les systèmes de production : application à la conduite d'un atelier à traitement de surfaces, Thèse de troisième cycle, INPG, Grenoble, juin 1999.
- [Chilique et al. 93] Chilique P., Quenec'hud Y., Bellorin J., Jost R. et Rissel H., Structuration et conception des systèmes réactifs de décision et de conduite des procédés continus à traitement par lot, 2<sup>e</sup> colloque Bilan A2RP, Janvier 1993.
- [Christopher, 05] Christopher M., Logistics and Supply Chains management, Financial Times Prentice Hall, 2005.
- [Christopher, 92] Christopher, M.L., Logistics and Supply Chain Management. Pitman Publishing, London, 1992.
- [Christopher, 98] Christopher M., Logistics and supply chain management – Strategies for reducing cost and improving service. Pitman publishing, 1998.
- [Cohendet et al., 90] Cohendet P. et Llerena P. Nature de l'information, évaluation et organisation de l'entreprise. Revue d'économie industrielle, n°51, 1<sup>er</sup> trimestre, 1990.
- [Colomb, 01] Colomb P., Technique de gestion de production : MRP, JAT et OPT. In Gestion de Production (J. Erschler, B. Grabot), Hermers Sciences Publications Traité IC2, 2001.
- [Courtois et al., 95] Courtois A., Martin-Bonnefous C. et Pillet M., Gestion de Production. Les éditions d'organisations, 3<sup>ème</sup> édition, Paris, 1995.
- [Croom et al., 00] Croom, S., Romano, O. et Giannakis, M., Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. European Journal of Purchasing & Supply Management, vol. 6, pp. 67-83, 2000.
- [Dahlgaard et al., 07] Dahlgaard J. J., Kristensen K. and Kanji G. K., Fundamentals of Total Quality Management,. Taylor&Francis, 2007.
- [Davis, 93] Davis T., Effective supply chain management, Sloan Management Review, vol. 34, pp. 35–46, 1993.
- [Despontin-Monsarrat, 04] Despontin-Monsarrat, E., Aide à la décision pour une coopération interentreprises dans le cadre de la production à la commande. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
- [Desroches et al., 03] Desroches A., Leroy A., Vallée F., La gestion des risques principes et pratiques, Hermès Science publication, édition Lavoisier, 2003.
- [Dolgui et al., 06] Dolgui A. et Proth J.M. Les systèmes de production modernes. Volume 1, Lavoisier, Paris, 2006.
- [Dominguez et al., 04] : 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, Vol. 42, No 11, pp 2113-2140, 01 June 2004.
- [Durieux et al., 03].., Durieux S., Pierreval H., De la notion de robustesse dans les études de simulation, 4<sup>e</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'03, Toulouse, du 23 au 25 avril, 2003.

- [Ellram, 91] Ellram, L., Supply Chain Management: the industrial organization perspective. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol.21. Iss.1, pp 13-22, 1991.
- [Epstein et al., 98] Epstein M., Manzoni J.F, Implementing corporate strategy: from tableaux de bord to balanced scorecards, *European Management Journal*, vol 16, pp.199-203, 1998.
- [Escudero et al., 99] Escudero L.F., Galindo E., Garcia G., Gomez E, Sabau V., Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operations Research* 119(1):14–34, 1999.
- [Esquirol et al., 99] Esquirol P. et Lopez P., L'ordonnement. *Economica*, 1999.
- [Féniès, 06] Féniès P., Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels: application pour l'évaluation des performances de la supply chain. Thèse soutenue à l'université Blaise Pascal – Clermont II, 2006.
- [Fontan et al., 01] Fontan G. et Mercé C. Erschler J., La planification des flux de production. In *Performance Industrielle et Gestion des flux* (P. Burlat, J.P. Campagne), Hermers Sciences Publications Traité IC2, 2001.
- [Fontan et al., 05] Fontan, G., Mercé, C., Hennet, J.C. et Lasserre, J.B., Hierarchical scheduling for decision support, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.16, N°2, pp.235-242, 2005.
- [François et al., 06] François, J., Deschamps, J.C., Fontan, G. et Bourrieres, J. P., Collaborative planning for enterprises involved in different supply chains. *International Conference on Service Systems & Service Management (ICSSSM'06)*, Troyes (France), 2006.
- [François, 07] François J., Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance, Thèse de doctorat à l'université Bordeaux1, 2007.
- [Frein, 03] Frein Y., 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, Grenoble, France Septembre 2003.
- [Galasso et al., 09] Galasso F., Thierry C., Design of cooperative processes in a customer-supplier relationship : An approach based on simulation and decision theory. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, pp.865-881, 2009.
- [Galasso, 07] Galasso F. Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [Galbraith, 73] Galbraith J., *Designing complex organizations*, Addison-Wesley, Massachussets, 1973.
- [Ganeshan et al., 95] Ganeshan R. et Harrison T., *An introduction to supply chain management*. Penn State University, department of Management Science and Information Systems, 1995.
- [Genin et al., 07] Genin P., Thomas A. and Lamouri S., “How to manages robust tactical planning with year APS”, *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 209-221, 2007.
- [Genin et al., 08] Genin P., Lamouri S. and Thomas A., “Multi-facilities tactical planning robustness with experimental design”, *Production Planning and Control*, Vol. 19, No 2, 171-182, March 2008.

- [Génin, 03] Génin, P., Planification tactique robuste avec usage d'un APS : Proposition d'un mode de gestion par plan de référence. Thèse de Doctorat, École des Mines de Paris, 2003.
- [Geunes et al., 01] : Geunes J. et Chang B. Operations research models for supply chain management and design. In *Encyclopaedia of Optimization*, C.A. Floudas and P.M. Pardalos Eds, Kluwer Academic Publishers, 4: 133-145, 2001.
- [Gharbi et al., 07] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M, "Planification d'un partenaire d'une chaîne logistique", Workshop International: Logistique et Transport 2007 (LT'2007), Sousse (Tunisie), 18-20 Juillet 2007.
- [Gharbi et al., 08] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M, Approche à deux niveaux pour la planification réactive d'un partenaire d'une chaîne logistique", 7<sup>ème</sup> conférence internationale francophone (MOSIM'08), Paris, France, 31 Mars- 2 Avril 2008.
- [Gharbi et al., 09] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M, "Supply chain hierarchical planning under demand uncertainty", 39th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Troyes, France, 6-8 July, 2009.
- [Gharbi et al., 10] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M. "An approach for tactical planning under uncertain and disrupted environment ", IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Istanbul, Turkey, 10-13 Octobre 2010.
- [Gharbi et al., 12] Gharbi H., Mercé C., FONTAN G., Moalla M. "Decision-Making and Reactive Tactical Planning Approach", 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, 23-25 May 2012.
- [Giard, 03] Giard V., Gestion de la production et des flux. *Economica*, 3<sup>ème</sup> édition, 2003.
- [Godet, 97] Godet M., Les dangers de la (seule) réactivité, *Revue française de Gestion*, pp. 91-92, Novembre-Décembre 1991.
- [Gourc, 99] Gourc D., Le management des risques en contexte projet : Quelles problématiques ?, Ecole d'Été- Gestion scientifique du risque, 6-10 Septembre 1999.
- [Guide et al., 00] Guide Jr, V. D. R. and Srivastava, R., A review of techniques for buffering against uncertainty with MRP systems. *Production Planning and Control*, No. 11, 223-233, 2000.
- [Gupta et al., 03] Gupta A., Maranas C.D., Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering* 27(8-9):1219-1227, 2003.
- [Hallikas et al., 04] Hallikas J., Karvonen I., Pulkkinen U., Virolainen V.M, Tuominen M., Risk management processes in supplier networks, *Int. J. Production Economics*, vol. 90, pp. 47-58, 2004.
- [Hamann, 92] Hamann T., Le problème d'agencement des ressources à l'intérieur des cellules des systèmes de production. Thèse de doctorat d'automatique, Université de Metz, 1992.
- [Hax et al., 75] Hax A.C. and Meal H.C., Hierarchical integration of production planning and scheduling, *TIMS Studies in Management Science*, vol 1, Logistics, North Holland, American Elsevier, New York 1975.
- [Hétreux, 96] Hétreux G., Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : Robustesse et cohérence des décisions. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 1996.
- [Ho et al. 98] Ho, C. J. et Ireland, T. C., Correlating MRP system nervousness with forecast errors. *International Journal of Production Research*, No. 36 (8), 2289-2299, 1998.

- [Holton, 04] Holton, G.A., Defining risk. *Financial Analysts Journal* 60 (6), 19–25, 2004.
- [Huang et al., 03] Huang, G. Q., Lau, J. S .K. et Mak K. L., The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature. *International Journal of Production Research*, 41(7), p. 1483--1517, 2003.
- [Huber, 81] Huber P. J.. *Robust Statistics*, John Wiley & Sons. 198.
- [Huguet, 94] Huguet J.M., Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 1994.
- [Imai, 95] Imai M., *Kaizen la clé de la compétitivité japonaise*. Eyrolles, 1995.
- [ITGROUP-BGM, 99] ITGROUP-BGM, De la planification locale à l'optimisation globale : l'interaction dynamique entre les plans. Rapport interne, [www.supplychaincenter.com](http://www.supplychaincenter.com), Août 1999.
- [Jagdev et al., 03] Jagdev H. S., Brennan A., Browne J., *Strategic decision making in modern manufacturing*. Kluwer Academic Publishers, London, 2003.
- [Johnson et al., 74] Johnson L.A. and Montgomery D.C., *Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control*. John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [Jones et al., 1985] Jones T., Riley D., Using inventory for competitive advantage through Supply Chain Management. *International Journal of Physical Distribution and Material Management*, Vol.15, N°5, pp.16-26, 1985.
- [Kehoe et al, 01] Kehoe D.F. et Boughton N.J., New paradigms in planning and control across manufacturing supply chains – the utilisation of Internet technologies. *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 21, No 5/6, pp 582-593, 2001.
- [Kleijnen, 03] Kleijnen, J.P.C. and Gaury, E., Short-term robustness of production management systems: A case study. *European journal of operational research*, 148, 452 465, 2003.
- [Krupp, 97] Krupp, J. A. G., *Safety Stock Management*, *Production and Inventory Journal*, 3rd quarter, 11-18, 1997.
- [La Londe et al., 94] : B.J. La Londe et J.M. Masters. *Emerging Logistics Strategies: Blueprint for the next century*. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol 24, No 7, pp 35-47, 1994.
- [La, 04] La H.T., *Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 2004.
- [Lambert et al, 00] Lambert D.M. et Cooper M.C.. *Issues in Supply Chain Management*. *Industrial Marketing Management*, 29, pp 65-83, 2000.
- [Landeghem et al., 02] Landeghem, H. and Vanmaele, H., Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. *Journal of operations management*, 319, 1–15, 2002.
- [Lang, 03] Lang J., *Contribution à l'étude de modèles, de langages et d'algorithmes pour le raisonnement et la prise de décision en intelligence artificielle*, HDR UPS, 09/2003.
- [Le Quéré et al., 03] Le Quéré Y., Sevaux M., Tahon C., et Trentesaux D., *Reactive Scheduling of Complex System Maintenance in a Cooperative Environment with Communications Times*, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, vol. 33, n° 2, p. 225-234, 2003.

- [Lecompte-Alix, 01] Lecompte-Alix T., Un cadre formel de décision pour la planification multiniveau des systèmes de production réticulaires, Thèse de doctorat del'Université Bordeaux I, 2001.
- [Lee et al., 93] Lee H.L. and Billington C., Material management in decentralized supply chain. *Operation Research*, Vol 41, No 5, 1993.
- [Lee et al., 97a] Lee, H.L. et Ng, S.M., Introduction to the special issue on global supply chain management. *Production and Operations Management*, 6(3), 191--192, 1997.
- [Lee et al., 97b] Lee, J.H. and Yu, Z.H., Worst-case formulations of model predictive control for systems with bounded parameters. *Automatica*, 33, 765–781, 1997.
- [Lee et Billington 1993] Lee H.L. et Billington C., Material management in decentralized supply chain. *Operation Research*, vol 41, n°5, 1993.
- [Lemettre, 08] Lemettre J.F, Risque, information et organisation, Collection Presses Universitaires de sceaux. L'Harmattan, 2008.
- [Leung, 95] Leung, H. C., Neural Networks in Supply Chain Management, proceedings of the '95 engineering management- conference p. 347 – 352, 1995.
- [Lim et al. 96] Lim, J.M., Kim, K.S., Yum, B.J., and Hwang, H., Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi method. *Computers industrial engineering*, 31, 555–560, 1996.
- [Lorino, 01] Lorino P., La performance et ses indicateurs. Elements de définition. Dans *Indicateurs de performance sous la direction de Chantal Bonnefous et Alain Courtois*, Productique-Hermes, Paris, 2001.
- [Lummus et al., 99] Lummus, R. R., et Vokurka, R. J., Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 99/1, p. 11–17, 1999.
- [Mahmoudi, 06] Mahmoudi J., Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques : Application au secteur de l'électronique et des télécommunications, Thèse présenté à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'Espace, 2006.
- [Marquès et al., 09] Marquès G., Lamothe J., Thierry C., and Gourc D., A supply chain performance analysis of à pull inspired supply strategy faced to demand uncertainties, *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI 10.1007/s10845-009-0337-z, 2009.
- [Mentzer et al., 01] : Mentzer J.T., Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G., Defining the supply chain Management. *Journal of Business logistics*, Vol 22, No 2, 2001.
- [Mercé, 87] Mercé C., Cohérence des décisions en planification hiérarchisée, Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [Mercé et al., 01] Mercé C. et Fontan G., Hiérarchisation de la fonction planification. In *Organisation et Gestion de Production (J. Erschler, B. Grabot)*, Hermers Sciences Publications *Traité IC2*, 2001.
- [Miller, 01] Miller T., Hierarchical operations and supply chain planning. Springer, 2001.
- [Min et al, 02] Min H., Zhou G.. Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering* 43, 2002, pp 231-249, 2002.
- [Montgomery, 97] Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley, 1997.

- [Mulvey et al. 95a] Mulvey J.M., Vanderbei R.J., Zenios S.A., Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research* 43(2):264–281, 1995.
- [Mulvey et al. 95b] Mulvey J.M., Ruszczyński A.J., A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operatipons Research* 43(3):477–490, 1995.
- [Nissen, 02] Nissen, M.E. Agent-based supply chain integration. *Information Technology and Management*, 2, p. 289--312, 2001.
- [Orlicky, 75] Orlicky J.A., *Material Requirement Planning*. Mc Graw-Hill Book Co, New York 1975.
- [Oustaloup, 94] Oustaloup A. *La robustesse : analyse et synthèse de commande robuste, Traité des nouvelles technologies*, Hermès, série Automatique, Paris, 1994.
- [Parrod, 05] Parrod N. « Analyse d'un processus de coopération entre donneur d'ordres et sous-traitant au sein d'une chaîne logistique projet : Une approche par simulation. », Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2005.
- [Peidro et al. 09] Peidro D., Mula J., Poler R., and Lario F.C., Quantative models for supply chain planning under uncertainty : a review. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 43:400-420, 2009.
- [Pellet, 85] Pellet X., *Sur la hiérarchisation des décisions. Application à la conduite d'atelier*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, Septembre, 1985.
- [Pierreval et al. 02] Pierreval H., and Durieux S., A two-stage simulation optimization heuristic for robust design, *Proceedings of IEEE SMC 2002*, Hammamet, Tunisie, 6-9 Octobre 2002.
- [Poirier et al., 2001] Poirier C., et Reiter S.E., *La Supply Chain*. Dunod, 2001.
- [Pokojski et al., 10] Pokojski J., Fukuda S. et Salwinski J. *New world situation : New directions in concurrent engineering*. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Concurrent Engineering*, Springer-Verlag, London, 2010.
- [Pomerol, 01] Pomerol J.C., Scenario development and practical decision making under uncertainty, *Decision Support Systems*, 31, p 197-204, 2001.
- [Pyke et al., 93] Pyke D.F., Cohen M.A. Multiproduct integrated production–distribution systems. *European Journal of Operations Research* 68(1):23–48, 1993.
- [Pyke et al., 94] Pyke D.F., Cohen M.A. Performance-characteristics of stochastic integrated production–distribution systems. *European Journal of Operations Research* 74(1):18–49, 1994.
- [Rabelo et al., 04] Rabelo, L., Helal, M., Lertpattarapong, C., analysis of supply chains using system dynamics, neural nets, and eigenvalues, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 2004.
- [Rota, 98] Rota K., *Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique*, Thèse ENSAE, 1998.
- [Rota-Franz et al., 01] : Rota-Franz K., Thierry C., Bel G.. *Gestion des Flux dans les chaînes logistiques*. In *Performances industrielles et gestion des flux* (P. Burlat, J.P. Campagne) Hermès Traité IC2, pp 153-186, 2001.
- [Roux, 97] Roux W., *Une approche cohérente pour la planification et l'ordonnancement de systèmes de production complexes*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1997.

- [Roy 04] Roy, B., « Robustesse de quoi et vis-à-vis de quoi mais aussi robustesse pourquoi en aide à la décision ? », in : Henggeler Antunes C., Figueira J., Clímaco J. (eds.) : Aide Multicritère à la Décision – Multiple Criteria Decision Aiding, 56<sup>e</sup> Journées du Groupe de Travail Européen « Aide Multicritère à la Décision » – 56<sup>th</sup> Meeting of the European Working Group « Multiple Criteria Decision Aiding », Coimbra, Portugal, October 3-5, 2002, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, INESC Coimbra, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, 29-39., 229, 2004.
- [Roy, 05] Roy, B., A propos de robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision. In Flexibilité et robustesse en ordonnancement (J.C Billaut, A. Moukrim, E. Sanlaville), Hermers Sciences Publications Traité IC2, 2005.
- [Roy, 98] Roy, B., A missing link in OR-DA: robustness analysis. *Foundations of computing and decision sciences*, 23, 141–160, 1998.
- [Savage, 54] Savage, L.J., *The Foundations of Statistics*, New York : Dover Publication Inc., 1954.
- [Sénéchal, 04] Sénéchal O., *Pilotage des systèmes de production vers la performance globale. Habilitation à Diriger des Recherches*, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, 2004.
- [Shapiro, 1998] Shapiro J., *Bottom-up versus top-down approaches to supply chain modelling in Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers, p.739-759, 1998.
- [Shi, 04] Shi D., A review of enterprise supply chain risk management, *Journal Of Systems Science And Systems Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp219-244, 2004.
- [Simchi-Levi et al., 03] Simichi-Levi D., Kamnisky P., Simchi-Levi E., *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies*, McGraw-Hill/Irwin, New York, second edition, 2003.
- [Slim et al., 07] Selim H, Araz C, Ozkarahan I., Collaborative production–distribution planning in supply chain: a fuzzy goal programming approach. *Transp Res Part E Logist Trans Rev* 44:396–419, 2007.
- [Sodhi et al., 09] Sodhi M. S., Tang C. S., Modeling supply chain planning under demand uncertainty using stochastic programming : A survey motivated by asset-liability management, *International Journal of Production Economics*, 121, pp. 728-738, 2009.
- [Srinivasa Raghavan et al., 02] Srinivasa Raghavan, N. R. et Viwanadham N., Stochastic models for analysis of supply chain networks, *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK May 8-10, 2002.
- [Stadtler et al., 00] : Statler H. et Kilger C., *Supply Chain Management and Advanced Planning : concepts, models, software and case studies*. Editions Springer Verlag, 2000.
- [Stadtler et al., 00] : Statler H. et Kilger C., *Supply Chain Management and Advanced Planning : concepts, models, software and case studies*. Editions Springer Verlag, 2000.
- [Stadtler et al., 05] Stadtler, H., et Kilger, C., (Ed.), *Supply Chain Management and Advanced Planning*, 3e ed., (Springer: Berlin), 2005.
- [Stalk et al., 90] Stalk G., Hout T., How time-based management measures performance, *Planning Review* 26 (9 (November–December)), 1990.

- [Stock et al, 98] Stock, G.N., Greis, N.P. et Kasarda, J.D. Logistics, strategy and structure. A conceptual framework, *International Journal of Operations & Production Management*, 18(1), p. 37--52, 1998.
- [Taguchi, 87] Taguchi, G.,. Orthogonal arrays and linear graph. Livonia, MI: American Supplier Institute Press, 1987.
- [Tang et al., 10] Tang O. Nurmaya Musa S., Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics*, doi:10.1016, 2010.
- [Tayur et al., 99] Tayur S., Ganeshan R., M. Magazine, Quantitative models for supply chain management, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Tchernev, 97] Tchernev N., La modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production. Thèse de doctorat en informatique, Université Blaise Pascal, Clermont II, 1997.
- [Telle, 03] Telle, O., Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace. Toulouse, 2003.
- [Thierry, 03] Thierry C., Gestion de chaînes logistiques, Modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme. Mémoire HDR, Université Toulouse 2 Le Mirail, 2003.
- [Thomas et al., 96] D.J. Thomas, P.M. Griffin. Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*. 94, pp 1-15, 1996.
- [Thonemann, 02] Thonemann, U.W. Improving supply-chain performance by sharing advance demand information. *European Journal of Operational Research*, 142, p. 81--107, 2002.
- [Trkman et al., 09] Trkman P. and McCormack K., Supply chain risk in turbulent environments- A conceptual model for managing supply chain network risk, *International Journal of Production Economics*, 119, 247-258, 2009.
- [Vincke, 03] Vincke P., About Robustness Analysis Series 3, No. 8, EURO Working Group-Multicriteria Decision Aiding (EWG-MCDA), Fall 2003.
- [Vollmann, 97] Vollmann T.E., Berry W.L., and Whybark D.C., Manufacturing planning and control systems, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1997.
- [Whybark et al., 76] Whybark, D. C. et Williams, J. G., Material Requirements Planning Under Uncertainty. *Decision Sciences*, 7, p. 595-606, 1976.
- [Xiaohui et al., 06] Xiaohuil W., Xiaobing Z., Shijil S., Cheng W., Study on risk analysis of supply chain enterprises, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol .17, pp. 781 -787, 2006.
- [Zapfel, 98] Zapfel G., Customer-order-driven production: an economical concept for responding to demand uncertainty. *International journal of production economics*, 56/57, 699–709, 1998.
- [Zhao et al., 97] Zhao X. et Lam K. Lot sizing rules and freezing the master production schedule in material requirements planning systems. *International Journal of Production Economics*, 53, 281–305, 1997.

---

## Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique

---

### Résumé

Ce travail s'intéresse à la planification tactique de chaînes logistiques dans un environnement incertain et perturbé. Dans le cadre de relations « point-à point », nous proposons une approche permettant d'élaborer une planification tactique optimale et réactive d'un maillon d'une chaîne logistique en présence de paramètres incertains et de perturbations.

Notre approche se fonde sur une structure à deux niveaux décisionnels. Le premier niveau effectue une planification agrégée en minimisant le coût global de production. Il établit ensuite « un plan de guidage » qui est transmis au niveau détaillé. Ce dernier effectue sa planification en suivant « au mieux » le plan de guidage et en prenant en compte les contraintes et données détaillées ignorées au niveau supérieur.

Le niveau détaillé adopte un processus dynamique de planification à horizon glissant. Il réactualise ses données à chaque étape de planification afin d'assurer la réactivité du processus décisionnel. Nous caractérisons explicitement l'inertie du système décisionnel en distinguant deux phases : la phase d'anticipation et la phase de réalisation. Chaque phase est caractérisée par un délai temporel. Ainsi, nous proposons une modélisation originale du processus décisionnel de chaque décision via trois variables. Le niveau détaillé est formulé selon un programme linéaire.

Au niveau agrégé, nous proposons un modèle global ayant l'originalité de prendre en compte les spécificités du processus décisionnel détaillé.

Le couplage entre les deux niveaux est assuré par le plan de guidage. Selon les informations incluses dans le plan de guidage, le niveau agrégé accorde un certain degré d'autonomie au niveau détaillé, ceci conditionne la réactivité et la robustesse de la planification. Dans notre travail, nous considérons trois types de guidage : deux guidages budgétaires « globaux » et un guidage « prescriptif » par la sous-traitance agrégée.

Notre approche est évaluée par simulation dans le cadre d'une demande incertaine. Pour cela, nous développons deux outils de simulation et un ensemble d'indicateurs de performances. Les expérimentations réalisées confirment la performance de notre approche par rapport à des approches classiques et mettent en évidence l'influence du type de guidage et du profil de la demande détaillée sur la réactivité et la robustesse des solutions trouvées.

**Mots-Clés :** chaîne logistique, planification tactique, processus décisionnel, approche hiérarchisée, incertitude de la demande, réactivité, robustesse, programmation linéaire, simulation.

---

## Reactive and robust planning within a supply chain

---

### Abstract

This work focuses on the supply chain tactical planning problem in an uncertain and disrupted environment. As part of point-to-point relationships, we propose an optimal and reactive tactical planning approach of a supply chain link in the presence of uncertain parameters and disturbances.

Our approach is based on a two-level decision structure. The first level performs an aggregate planning which minimizes the overall production cost. It establishes "a guiding plan" which is transmitted to the detailed level. This latter performs its planning by following a guiding plan and by taking into account detailed constraints and data.

The detailed level adopts a dynamic planning process with a rolling horizon. It updates its data at every planning step to ensure a reactive decision making. We characterize explicitly the inertia of a decision making system by distinguishing two decision phases: the anticipation phase and the realization phase. Each phase is described by a time delay. Thus, we propose an original model of decision making process in which every decision is modeled by three variables. The detailed level is formulated according to a linear program.

At the aggregate level, a view of the detailed decisional process is integrated by work-in-progress constraints. We propose an aggregate model whose originality is to consider the specifics of the detailed decision process.

The coupling between the two levels is provided by the guiding plan. According to aggregated data included in this plan, the aggregate level gives a specific autonomy to the detailed level which conditions the reactivity and the robustness of the detailed planning. In our work, we consider three types of guidance: two "global" budget guidings and a more "precise" subcontracting aggregate guiding.

Our approach is evaluated by simulation under uncertain demand. For this we develop two simulation tools and a set of performance indicators. The experiments carried out confirm the performance of our approach over conventional approaches and highlight the influence of the guiding and the detailed demand profile on the reactivity and robustness of the solutions.

**Key-words:** supply chain, tactical planning, decisional process, hierarchical approach, demand uncertainty, reactivity, robustness, linear programming, simulation.