



HAL
open science

Planification d'une chaîne logistique: approche par satisfaction de contraintes dynamiques

Mariem Trojet

► **To cite this version:**

Mariem Trojet. Planification d'une chaîne logistique: approche par satisfaction de contraintes dynamiques. Automatique. INSA de Toulouse, 2014. Français. NNT: . tel-00996957

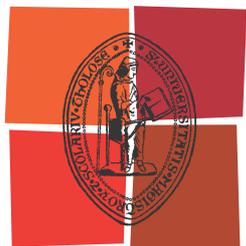
HAL Id: tel-00996957

<https://theses.hal.science/tel-00996957v1>

Submitted on 28 May 2014

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 :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Cotutelle internationale avec "Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)"

Présentée et soutenue par :

Mariem TROJET

le 17/04/2014

Titre :

Planification d'une chaîne logistique : Approche par satisfaction de contraintes dynamiques

École doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Génie Industriel 4200046

Unité de recherche :

LAAS-CNRS / UR MSSDT

Directeur(s) de Thèse :

M. Pierre LOPEZ, Directeur de recherche (LAAS-CNRS, Toulouse, France)
M. Ali ZGHAL, Professeur (ENSIT, Tunis, Tunisie)

Jury :

Mme ZEGHAL Farah, Maître de conférences (ENIT, Tunis, Tunisie), Président
M. KORBAA Ouajdi, Professeur (ISITCom, Hammam Sousse, Tunisie), Rapporteur
M. DUPAS Rémy, Professeur (Université de Bordeaux, France), Rapporteur
M. ESQUIROL Patrick, Maître de conférences (INSA, Toulouse, France), Examineur
Mme BOUCHRIHA Hanen, Maître de conférences (ENIT, Tunis, Tunisie), Examineur
M. H'MIDA Fehmi, Maître assistant (ESTI, Tunis, Tunisie), Invité

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE I.GESTION DES ACTIVITES DE PRODUCTION : CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU TRAVAIL DE RECHERCHE	7
I.1. Introduction	8
I.2. La gestion de production	8
I.2.1. Le système de production	9
I.2.2. Le système de gestion : structure décisionnelle multi-niveaux	11
I.2.3. Offres en logiciels pour la gestion de la production	16
I.3. Modèles de Planification – Ordonnancement	19
I.3.1. Planification : modèles par quantités	20
I.3.2. Ordonnancement : Modèles par dates	22
I.4. La Planification : un vecteur de hiérarchisation et d'intégration	24
I.4.1. Les approches multiniveaux : supports de la hiérarchisation verticale	24
I.4.2. Les processus de planification : supports de l'intégration horizontale	31
I.5. La chaîne logistique	35
I.5.1. Structure des chaînes logistiques	36
I.5.2. Catégories des chaînes logistiques	38
I.5.3. Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management – SCM)	40
I.5.4. Offres en logiciels pour la gestion de la chaîne logistique (SCM)	42
I.6. Conclusion	44
CHAPITRE II.LES PROBLEMES DE SATISFACTION DE CONTRAINTES	45
II.1. Introduction	46
II.2. Le Problème de Satisfaction de contraintes (CSP)	47
II.2.1. Définitions et notions	47
II.2.2. Techniques de propagation de contraintes	50
II.2.3. Méthodes de résolution d'un CSP	52

II.2.4. CSP et optimisation	56
II.3. Problèmes de satisfaction de contraintes dynamiques (DCSP)	57
II.3.1. Définitions DCSP	57
II.3.2. DCSP et autres formalismes	59
II.3.3. CSP conditionnels	59
II.4. Résolution d'un CSP dynamique	60
II.4.1. Approche par réutilisation de solution	61
II.4.2. Approche par réutilisation du raisonnement	64
II.5. Conclusion	65
 CHAPITRE III. APPROCHE INTEGREE POUR LA PLANIFICATION DYNAMIQUE : CONCEPTS ET MODELES	 67
III.1. Introduction	68
III.2. Objectifs de l'étude	68
III.3. Approche proposée : structure décisionnelle à deux niveaux	70
III.3.1. Structure de la chaîne logistique considérée	70
III.3.2. Processus et leviers décisionnels considérés	73
III.4. Planification dynamique	74
III.4.1. Processus de prise de décision	74
III.4.2. Planification à horizon glissant	76
III.4.3. Procédure de planification	79
III.5. Modélisation du processus de planification dynamique	80
III.5.1. Modèle planification de la production : Premier niveau de décision	80
III.5.2. Modèle ordonnancement agrégé : Deuxième niveau de décision	84
III.5.3. Interaction énergétique entre les deux niveaux de décision	86
III.6. Conclusion	88
 CHAPITRE IV. ANALYSE DE PERFORMANCE : DEMARCHE METHODOLOGIQUE	 91
IV.1. Introduction	92
IV.2. Objectifs et Démarche	93
IV.2.1. Objectifs de l'analyse : Mesurer la stabilité et la robustesse	93
IV.2.2. Approche comparative : CSP statique vs CSP dynamique	95
IV.3. Procédures de résolution : CSP Statique et CSP Dynamique	95
IV.3.1. Procédure de résolution CSP statique	96

IV.3.2. Procédure de résolution CSP dynamique	98
IV.4. Indicateurs de performance	101
IV.4.1. Protocole d'évaluation de la performance	101
IV.4.2. Notions de Distance et de Poids de Perturbation	101
IV.4.3. Indicateurs de performance au niveau Site de production	103
IV.4.4. Indicateurs de performance au niveau chaîne logistique	105
IV.5. Conclusion	107
 CHAPITRE V. EXPERIMENTATION NUMERIQUE ET EVALUATION DE L'APPROCHE	 109
V.1. Introduction	110
V.2. Présentation du cas d'étude	110
V.2.1. Description de la structure et des données de la chaîne logistique	110
V.2.2. Problématique et scénarios considérés	113
V.3. Évaluation de la stabilité et robustesse au niveau Site de production	114
V.3.1. Expérimentation avec une variation de la demande	114
V.3.2. Expérimentation avec une variation de la capacité	120
V.3.3. Expérimentation avec une variation de re-planification	126
V.4. Analyse de sensibilité de la chaîne logistique : Résolution statique vs. dynamique	134
V.4.1. Sensibilité de la chaîne logistique face aux variations : niveau planification	135
V.4.2. Sensibilité de la chaîne logistique face aux variations : niveau ordonnancement	136
V.4.3. Sensibilité comparative de la planification /ordonnancement face aux variations	137
V.4.4. Sensibilité de la fonction objectif face aux variations	140
V.5. Conclusion	142
 CONCLUSION GENERALE	 143
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 147

Liste des figures

Figure I.1. Interactions entre système de production, système de gestion et environnement [Dauzère-Pérès, 1992].....	9
Figure I.2. Vision systémique de la gestion d'un système de production [Despontin-Monsarrat, 2004].....	12
Figure I.3. Structure décisionnelle à trois niveaux [Dauzère-Pérès, 1992].....	14
Figure I.4. Modélisation des décisions de planification dans le MRP II, d'après [Thomas, 2003].....	17
Figure I.5. Classification des modèles de lot-sizing [Rota, 1998].....	21
Figure I.6. Classification des problèmes d'ordonnancement : Modèles par dates [Lopez, 1991].....	23
Figure I.7. Procédure itérative [Fontan et Imbert, 1985].....	28
Figure I.8. Méthode de résolution intégrée de Dauzère-Pérès [Wolosewicz, 2008].....	29
Figure I.9. <i>SCP-Matrix</i> [Stadtler et Kilger, 2005].....	32
Figure I.10. La planification : support d'intégration horizontale.....	34
Figure I.11. Représentation d'une chaîne logistique [Lee et Billington, 1993].....	36
Figure I.12. Différentes structures de la chaîne logistique, [Mahmoudi, 2006].....	38
Figure I.13. Exemple d'une entreprise multi-site [Thierry, 1994].....	39
Figure I.14. Positionnement de l'offre logicielle en SCM [Botta-Genoulaz, 2003].....	43
Figure II.1. Phase de propagation de contraintes [Lopez, 2001].....	53
Figure II.2. Les algorithmes de recherche CSP [Fischer, 2000].....	55
Figure II.3. Description du problème [Verfaillie et Jussien, 2005].....	62
Figure II.4. Méthode de recherche locale [Verfaillie et Jussien, 2005].....	63
Figure II.5. Méthode par relaxation-affectation de variables [Verfaillie et Jussien, 2005]....	64
Figure III.1. Processus de planification dynamique.....	70
Figure III.2. Structure de la chaîne.....	72
Figure III.3. Minimisation des en-cours [Moncel, 2010].....	74
Figure III.4. Phases de prise de décision [Gharbi <i>et al.</i> , 2009].....	75
Figure III.5. Processus de planification dynamique [Amrani-Zouggar, 2009].....	77
Figure III.6. Horizon de décision gelé, d'après [Thierry, 2003].....	78
Figure III.7. Approche proposée.....	79
Figure III.8. Interaction énergétique entre les deux niveaux de décision.....	88
Figure IV.1. Schéma d'actualisation d'un problème de planification.....	92
Figure IV.2. Algorithme de réparation.....	99
Figure V.1. Gamme de fabrication des différents produits.....	112
Figure V.2. Variation de la demande.....	114
Figure V.3. Variation de la capacité à la période $t = 13$	121
Figure V.4. Variation de re-planification en période $t = 13$	127

Figure V.5. Variation de re-planification en période $t = 14$	127
Figure V.6. Poids de perturbation pour la variable I (Site 1) avec une variation de la demande	134
Figure V.7. Evaluation de la robustesse au niveau chaîne logistique pour les 3 types de variation.....	135
Figure V.8. Evaluation de la stabilité au niveau chaîne logistique pour les 3 types de variation	135
Figure V.9. Evaluation de la robustesse au niveau ordonnancement pour les 3 types de variation.....	136
Figure V.10. Evaluation de la stabilité au niveau ordonnancement pour les 3 types de variation.....	137
Figure V.11. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la demande	138
Figure V.12. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la capacité.....	138
Figure V.13. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de re-planification	138
Figure V.14. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la demande	139
Figure V.15. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la capacité.....	139
Figure V.16. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de re-planification	140
Figure V.17. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de la demande.....	140
Figure V.18. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de re-planification	141
Figure V.19. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de la capacité.....	141

Liste des tableaux

Tableau II.1. Données du problème.....	49
Tableau II.2. Effets des transformations élémentaires [Richaud, 2009].....	58
Tableau IV.1. Tableau de synthèse des indicateurs de performance (niveau sites).....	106
Tableau IV.2. Tableau de synthèse des indicateurs de performance (niveau chaîne logistique)	107
Tableau V.1. Délais et coûts de production des produits.....	111
Tableau V.2. Coûts unitaires de stockage et de rupture.....	111
Tableau V.3. Profil de la demande (première itération de planification : $k = 1$).....	111
Tableau V.4. Capacité des sites de production.....	112
Tableau V.5. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la demande : premier niveau de décision.....	116
Tableau V.6. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la demande : deuxième niveau de décision.....	116
Tableau V.7. Variation de la demande : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production).....	117
Tableau V.8. Variation de la demande : Evaluation de la perturbation au niveau sites (ordonnancement agrégé).....	118
Tableau V.9. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la capacité : premier niveau de décision.....	122
Tableau V.10. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la capacité : deuxième niveau de décision.....	122
Tableau V.11. Variation de la capacité : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production).....	123
Tableau V.12. Variation de la capacité : Evaluation de la perturbation au niveau sites (ordonnancement agrégé).....	124
Tableau V.13. Exemple de variation de re-planification.....	126
Tableau V.14. Résultats numériques dans le cas d'une variation de re-planification : niveau planification.....	129
Tableau V.15. Résultats numériques dans le cas d'une variation de re-planification : niveau ordonnancement agrégé.....	129
Tableau V.16. Variation de re-planification : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production).....	130
Tableau V.17. Variation de re-planification : Evaluation de la perturbation au niveau sites (ordonnancement agrégé).....	131

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'une convention de cotutelle de thèse entre l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), 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 Raja Chatila et Jean Arlat, directeurs successifs du LAAS depuis mon entrée, de m'avoir accueilli dans ce laboratoire. Je remercie également Messieurs Pierre Lopez et Christian Artigues, directeurs de recherche au CNRS de m'avoir accueilli et facilité mes séjours au sein du groupe Recherche Opérationnelle, Optimisation Combinatoire et Contraintes (ROC) dont ils ont eu la responsabilité, et Monsieur Ali Zghal pour m'avoir accueillie au sein de l'unité de recherche Mécanique des Solides, des Structures et Développement Technologique (UR MSSDT).

Je remercie très sincèrement mes encadrants de thèse M. Pierre Lopez et M. Ali Zghal. Merci pour votre sympathie et votre constante bonne humeur. Je ne vous remercierai jamais assez pour vos encouragements dans les moments difficiles et votre soutien tout au long de cette thèse. Je tiens à remercier également et à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant scientifique, M. Fehmi H'Mida. Le suivi de mes travaux, vos conseils avisés et vos critiques m'ont permis de mener à bien ces travaux. Merci pour la confiance dont vous m'avez toujours témoigné.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. Patrick Esquirol. Sa gentillesse, son expérience, son optimisme et ses encouragements m'ont beaucoup apporté et aidé durant ces quatre dernières années. Je tiens à le remercier plus particulièrement pour m'avoir aidé en matière de programmation informatique.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail de thèse : Messieurs Ouajdi Korbaa, Professeur à l'Institut Supérieur d'Informatique et des Techniques de Communication à Hammam Sousse et Rémy Dupas, Professeur à l'Université de Bordeaux en leur qualité de rapporteurs, Madame Farah Zeghal, Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, en sa qualité de président de jury.

J'adresse ma sincère reconnaissance à Madame Hanen Bouchriha, Maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite remercier chaleureusement tous les membres de l'équipe ROC, permanents, doctorants et stagiaires. Ce fut un réel plaisir de travailler à vos côtés. Merci Boadu, Touria, Panwadee, Kata, Maria, Hassan. Je n'oublie pas non plus les anciens du groupe qui m'ont beaucoup aidé, merci à Wafa, Oumar et William. Mes remerciements s'adressent également à la secrétaire de l'équipe Christèle Mouclier. Aussi, je tiens à remercier mes amis en dehors du groupe, merci à Romaric, Imene, Ahmed, Fatma, Iskander.

Merci également aux membres de l'unité de recherche MSSDT, et en particulier Messieurs Fethi Abassi et Frej Chaouachi. Je ne manquerai pas non plus de remercier mes collègues de l'Ecole Supérieure de Technologie et d'Informatique de Tunis – Tunisie.

Finalement, je tiens à remercier mes très chers parents sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Merci surtout pour leur patience, leur courage et leur sacrifice. Comment ne pas remercier mon adorable sœur et mon adorable frère. Simplement merci...

Introduction générale

A partir des années 90, l'évolution du contexte économique a amené les entreprises, dans un climat de concurrence mondialisée, à s'adapter au marché tout en améliorant la maîtrise du coût, de la qualité et du délai de fabrication des produits. Ainsi, et dans le but d'accroître leurs compétences, les entreprises ont opté pour une spécialisation de leurs activités et un recentrage métier. Elles s'organisent alors en réseaux pour externaliser leurs activités secondaires et développer une meilleure qualité de service à leurs clients. Ainsi, *une chaîne logistique peut se définir comme la coopération de tous les partenaires industriels pour l'élaboration d'une famille de produits finis* [François, 2007].

Les technologies de l'information et les systèmes d'information associés ont fortement influencé l'évolution des chaînes logistiques avec l'implantation d'outils support à la collaboration. Nous trouvons notamment : les APS (Advanced Planning System), les ERP (Enterprise Resource Planning), les MES (Manufacturing Execution Systems), etc. ([Galasso, 2007], [Gharbi, 2012]). Plusieurs outils sont alors développés afin d'aider aux prises de décision, du niveau le plus haut (stratégie générale de l'entreprise) au niveau le plus bas (fonctionnement des machines dans l'atelier de fabrication).

Très souvent, les décisions tactiques (Planification) sont prises indépendamment des décisions opérationnelles (Ordonnancement). Les contraintes de capacité de l'atelier sont modélisées grossièrement dans le calcul du plan, ce qui implique souvent la non faisabilité d'un plan de production. De plus, ce plan n'est pas remis en cause par le niveau opérationnel après avoir été transmis. Pour pallier ce problème, quelques approches proposant l'intégration de niveaux hiérarchiques de décision existent dans la littérature.

Notre travail s'intéresse à la planification tactique et opérationnelle d'une chaîne logistique et propose une approche décisionnelle à deux niveaux. Le modèle proposé intègre les décisions prises au niveau supérieur comme contraintes à respecter au niveau inférieur (niveau opérationnel) en vue de garantir la faisabilité du plan de production. Nous développons une structure intégrée dans le cadre d'une approche de satisfaction de contraintes. Ces deux niveaux seront modélisés sous forme d'un problème de satisfaction de

contraintes (**CSP** pour *Constraint Satisfaction Problem*). Le premier niveau de décision consiste à planifier les volumes de production de chaque site pour chaque produit, les volumes de production sous-traités ainsi que le nombre d'heures supplémentaires utilisées à chaque période de l'horizon de planification, tout en respectant la capacité pour les différents sites de production définie sous la forme d'un nombre d'heures de travail disponibles. Nous introduisons un coût correspondant à chaque type de décision et c'est en termes de coût qu'une solution est considérée comme plus favorable qu'une autre. Le deuxième niveau consiste à ordonnancer, pour chaque site, les dates de début des opérations de fabrication tout en respectant la limitation de la capacité des ressources de fabrication (nombre de machines).

Le recours à une structure décisionnelle intégrée nous a conduit à établir une interaction entre les niveaux supérieur (planification) et inférieur (ordonnancement agrégé). En s'appuyant sur un horizon discrétisé en périodes, le niveau supérieur transmet au deuxième niveau, à chaque période t , les quantités à lancer en production sur chaque site s . Ces variables sont soumises à des contraintes dites de conservation d'énergie, qui doivent être satisfaites par le niveau inférieur de décision.

Certaines données telles que les demandes clients, les ressources mises à disposition de la chaîne par chaque entité et les délais de production sont incertaines. Les éléments de la chaîne sont ainsi soumis à des perturbations et aléas divers. Ainsi, il ne suffit pas d'avoir des plans qui optimisent les coûts et les en-cours. Les plans de production successifs doivent être robustes et stables suite à des aléas dus aux variations de certaines données, c'est-à-dire permettant de minimiser les différences entre les quantités planifiées recalculées à chaque itération du processus de planification.

C'est dans ce contexte de planification tactique et opérationnelle, dans un environnement dynamique, que s'insèrent nos travaux de thèse. L'objectif de cette thèse est donc de proposer une approche intégrée qui répond aux problèmes d'incohérence entre les décisions tactiques et opérationnelles et qui assure une planification et un ordonnancement optimal tout en assurant la robustesse et la stabilité de la solution face aux perturbations.

Dans le but de minimiser l'effet des perturbations dues à ces incertitudes, les deux niveaux seront modélisés sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes dynamique (**DCSP** pour *Dynamic Constraint Satisfaction Problem*). En effet, un DCSP P est une suite P_0, \dots, P_n de CSP statiques où P_{i+1} diffère de P_i par un ajout ou un retrait de contraintes, variables,

valeurs. Notre contribution par cette approche revient à utiliser la solution relative au problème initial P_i pour la résolution du problème P_{i+1} sujet à des perturbations.

L'approche est évaluée à l'aide d'indicateurs de performance en vue de quantifier les apports en termes de robustesse et de stabilité. Les expérimentations sont effectuées à l'aide du logiciel ECL'PS^e 6.0 qui est une extension du langage Prolog incluant des bibliothèques de programmation par contraintes. Ces expérimentations sont menées sur la base d'un cas de planification de la production d'une chaîne logistique.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante. Le premier chapitre définit le contexte de notre étude et introduit la problématique générale à laquelle nous nous intéressons. Il reprend les notions de base de la gestion de production et propose une présentation des modèles de planification-ordonnancement de la production existant dans la littérature. Ensuite, un état de l'art des approches actuelles pour mettre en relation les décisions des niveaux planification et ordonnancement est présenté. Enfin, nous retraçons la nouvelle structuration des entreprises manufacturières sous la forme de chaîne logistique.

Le deuxième chapitre traite de la programmation par contraintes, les principes sur lesquels elle repose et les différentes méthodes de résolution. Ensuite, nous présentons un état de l'art des CSP dynamiques et des autres différents types de problèmes dynamiques qui peuvent exister. Nous présentons aussi les différentes méthodes de résolution associées.

Le troisième chapitre détaille les objectifs de l'étude. Nous présentons la structure de la chaîne logistique étudiée et les décisions qui y sont associées. Ensuite, nous étudions le processus de prise de décision et les différents délais correspondants. Enfin, nous introduisons le principe général du processus de planification dynamique à horizon glissant et nous proposons un modèle mathématique qui traduit notre approche intégrée de planification dynamique.

Le quatrième chapitre est consacré à l'expérimentation numérique de la structure décisionnelle hiérarchisée. Nous présentons un outil de simulation basé sur deux méthodes de résolution, une méthode de résolution statique et une méthode de résolution dynamique. Puis, nous développons les indicateurs de performance employés pour le niveau planification et le niveau ordonnancement.

Le cinquième et dernier chapitre porte sur l'analyse du modèle de planification dynamique et l'évaluation des deux approches de résolution CSP Statique / CSP Dynamique, et leurs impacts sur la conduite d'une chaîne logistique. Les expérimentations sont réalisées au niveau des sites de production et au niveau global de la chaîne logistique. Une solution est évaluée par sa performance à assurer un certain niveau de stabilité (mesure de la distance de perturbation P^N) et de robustesse (mesure du poids de perturbation P^E).

CHAPITRE I.

GESTION DES ACTIVITES DE PRODUCTION : CONTEXTE ET
POSITIONNEMENT DU TRAVAIL DE RECHERCHE

I.1.Introduction

Ce chapitre a pour but de positionner notre travail dans le vaste domaine de recherche portant sur la gestion des activités de production. Notre axe de recherche se focalise sur la définition d'un outil d'aide à la décision pour la planification de la production dans un cadre de chaîne logistique. Pour définir précisément notre problématique, nous présentons les principales assises conceptuelles et méthodologiques issues d'un état de l'art des recherches académiques.

La première partie reprend les notions de base de la gestion de production permettant de comprendre les intérêts et les enjeux intra et inter-entreprises. Elle permet de préciser notamment l'organisation d'un système de production, la structuration des décisions ainsi que l'offre des solutions logicielles. Les modèles de planification - ordonnancement de la production, issus de la littérature, font l'objet de la deuxième partie. La troisième partie est consacrée à la description des approches actuelles pour traiter le problème de planification dans sa dimension verticale et transversale, afin d'assurer une meilleure cohérence entre les niveaux de décision tactique et opérationnel. Dans la quatrième et dernière partie, nous présentons la nouvelle structuration des entreprises manufacturières sous la forme de chaîne logistique.

I.2.La gestion de production

Vincent Giard précise dans son ouvrage [Giard, 1988] que *« la gestion de production a pour objet la recherche d'une organisation efficace de la production de biens et de services. Elle s'appuie sur un ensemble d'outils d'analyse et de résolution de problèmes qui visent à limiter les ressources nécessaires à l'obtention d'une production dont les caractéristiques technico-commerciales sont connues »*.

[Blondel, 1997] définit la gestion de production comme *« la fonction qui permet de réaliser les opérations de production en respectant les conditions de qualité, délai, coûts qui résultent des objectifs de l'entreprise et dont le but est d'assurer un équilibre entre : les délais, le niveau d'emploi des ressources et le niveau des encours et des stocks »*

On sépare généralement le système de gestion où circule un flux d'informations, du système de production par lequel transite un flux de matières. Les interactions entre le

système de gestion, le système de production et son environnement extérieur peuvent être schématisée par la [figure I.1](#). [Dauzère-Pérès, 1992].

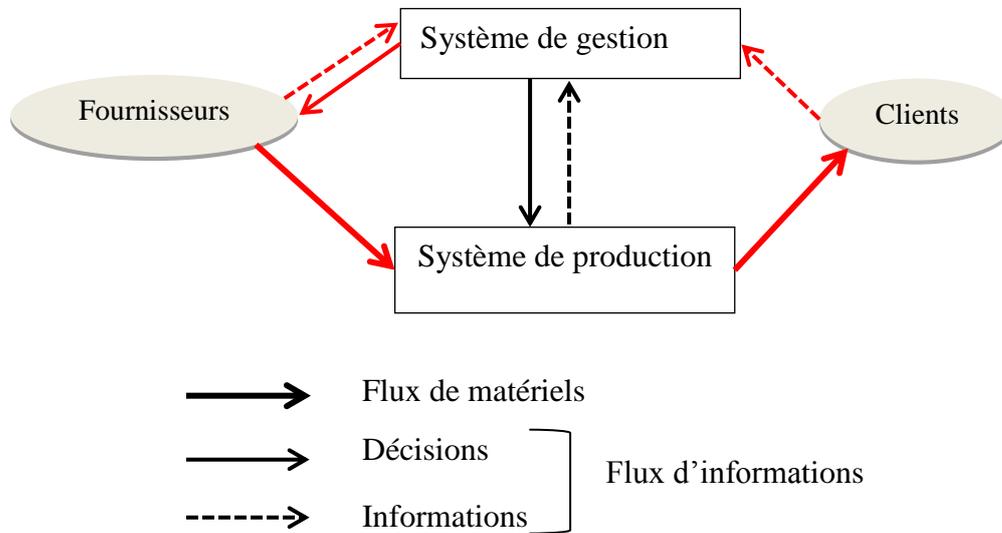


Figure I.1. Interactions entre système de production, système de gestion et environnement
[Dauzère-Pérès, 1992]

I.2.1. Le système de production

La notion de système de production a été définie par plusieurs auteurs dans la littérature scientifique. Nous rappelons ici la définition de quelques notions se rapportant aux systèmes de production, dans le contexte de la production de biens et de services. Bertalanffy caractérise un système comme « *un ensemble d'éléments en interaction* » [Bertalanffy, 1968]. Plus récemment, Lopez considère que « *la production est une opération de transformation d'un ensemble de matières premières ou de composants en produits finis et qu'un système de production est constitué de l'ensemble des éléments qui interviennent dans cette transformation et qui correspondent aux moyens ou ressources (humaines ou technologiques)* » [Lopez, 1991]. De son côté, Dauzère-Pérès définit un système de production comme étant « *un ensemble des ressources nécessaires, tant humaines que matérielles, qui permettent de transformer des matières premières en produits finis intégrant aussi les moyens de stockage, et même parfois ceux de distribution* » [Dauzère-Pérès, 1992].

Dans la littérature, il existe plusieurs typologies des systèmes de production ([Deschamps, 1994], [Roux 1997], [Giard, 2003]). Ces typologies sont notamment construites en fonction

de la politique de production, du mode de production et de l'organisation du flux de production.

La première typologie est déterminée par la politique de production. On distingue deux catégories : production à la commande et production pour stock.

- *La production à la commande* : La production est qualifiée de production à la commande lorsque le processus de fabrication, l'achat des matières premières, composants et consommables sont déclenchés à la réception d'une commande ferme d'un client. Ces systèmes concernent principalement les entreprises proposant une grande variété de produits dont la demande est très aléatoire ou bien lorsque les produits à réaliser sont étroitement liés aux clients (faible standardisation).
- *La production pour stock* : Une entreprise opte, en général, pour une organisation de production pour stock lorsqu'il est possible d'effectuer une prévision fiable de la demande. Ce type de système est envisagé pour des produits dont la gamme reste relativement stable, et lorsque la demande pour chaque produit est suffisamment importante et prévisible.

La seconde typologie est déterminée par le mode d'organisation de la production. On distingue trois catégories : les systèmes de production unitaire, les systèmes de production en petite et moyenne séries et les systèmes de production en grande série.

- *Les systèmes de production unitaire* : Ils s'intéressent à la fabrication d'un produit unique. Il est rare de constater la fabrication multiple du même produit. Ce type de production fait toujours l'objet d'un grand projet. Le type de production unitaire est rencontré par exemple dans un chantier naval (chaque navire fabriqué est unique), dans les entreprises de génie civil (construction d'un pont)...
- *Les systèmes de production en petite et moyenne séries* : Pour ces structures, la production est relativement diversifiée et fait l'objet d'une production limitée. Dans ce mode d'organisation, les ressources assurant la même fonction technique sont réunies en un même lieu. Il peut s'agir d'entreprises de grande taille, dans le secteur automobile par exemple, mais aussi de PME manufacturières et de sous-traitance.
- *Les systèmes de production en grande série* : Dans le cas où le nombre de produits à fabriquer est peu diversifié ou standardisé, on parle de production en grande série. Les moyens de production sont organisés sous forme de lignes de production spécifiques à

chaque produit (les équipements sont placés dans un ordre précis pour permettre à un produit de transiter par la même séquence de postes de travail).

La troisième typologie est déterminée par l'organisation du flux de production. On distingue en général deux catégories : les systèmes de production continue et les systèmes de production discontinue.

- *Les systèmes de production continue* : Ce type est retenu lorsqu'on traite des quantités importantes d'un produit ou d'une famille de produits. L'implantation est réalisée en ligne de production, ce qui rend le flux du produit linéaire. Dans ce type de production, les machines ou les installations sont dédiées au produit à fabriquer ce qui, en général, ne permet pas une grande flexibilité. En règle générale, ce type de production est accompagné d'une automatisation poussée des processus de production ainsi que des systèmes de manutention. Parmi les entreprises typiques utilisant ce type de système de production : les industries pétrochimiques, les cimenteries, etc.
- *Les systèmes de production discontinue* : Ce type est retenu lorsque l'on traite des quantités relativement moyennes de nombreux produits variés, réalisés à partir d'un parc de machines à vocation générale. Dans ce type de production, les machines ou les installations sont capables de réaliser un grand nombre de travaux, elles ne sont pas spécifiques à un produit, ce qui donne une grande flexibilité. Les industries mécaniques et les entreprises de confection sont des entreprises de ce type.

Ce travail de thèse s'intéresse aux entreprises manufacturières et étudie plus particulièrement le cas de la production à la commande, en petite et moyenne série avec flux de production discontinu. Après une description des principaux concepts et modes d'organisation des systèmes de production, le paragraphe suivant précise les notions générales du système de gestion de production définies dans un contexte intra-entreprises, celles-ci étant utiles pour comprendre la problématique associée à chaque entreprise.

I.2.2. Le système de gestion : structure décisionnelle multi-niveaux

Hétreux considère un système de gestion comme un système qui permet 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, 1996]. Il peut être structuré en deux sous-systèmes [Lemoigne, 1974], [Huguet, 1994], [Hétreux, 1996] :

- Le *sous-système d'information* qui regroupe les informations, relatives au système de production et à son environnement, qui sont utilisées par le sous-système de décision ;
- Le *sous-système de décision* qui élabore, à partir des informations disponibles dans le sous-système d'information, des décisions permettant d'assurer un fonctionnement convenable du système de production.

Classiquement, le système de gestion de production exerce quatre principales activités (cf. [figure I.2](#)) [Despontin-Monsarrat, 2004] : gestion des données techniques, gestion des matières, gestion des données commerciales et gestion des données du travail.

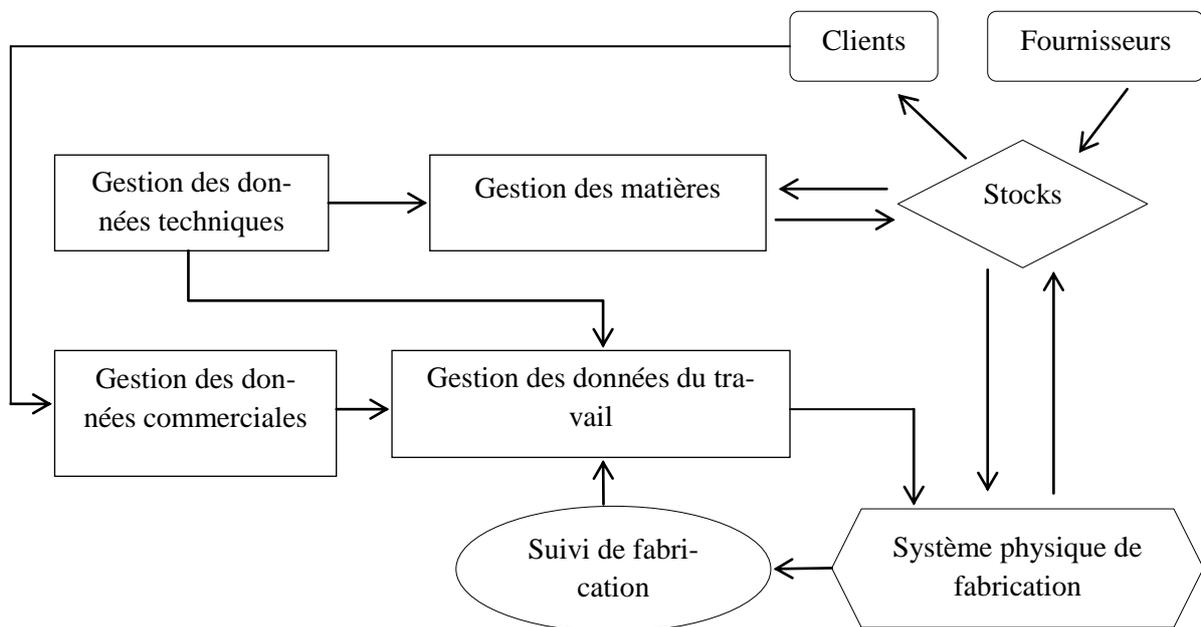


Figure I.2. Vision systémique de la gestion d'un système de production

[Despontin-Monsarrat, 2004]

- la *gestion des données techniques* qui recense les nomenclatures (listes des composants et/ou matières premières requis pour réaliser un produit donné) et les gammes opératoires (listes ordonnées d'opérations permettant de réaliser un produit donné) nécessaires à la fabrication des produits de l'entreprise. Cette gestion présente un aspect d'autant plus dynamique que la personnalisation des produits est forte, la réalisation étant alors systématiquement précédé d'une phase d'étude qui aboutit à la description détaillée du travail à réaliser. Ainsi, la notion de gamme opératoire n'existe véritablement que dans le contexte de productions en moyenne et grande séries. Dans

le contexte de la petite série ou du projet unitaire, on utilise plutôt la notion de gamme générique, lorsqu'un certain niveau d'abstraction et de réutilisation est possible, ou plus généralement de structure de décomposition du travail lorsque le produit à réaliser présente un caractère unique ;

- La *gestion des matières* qui assure l'approvisionnement en matières premières ou en composants semi-finis et le stockage des produits (finis ou semi-finis) fabriqués. Elle joue un rôle crucial dans le contexte d'une répartition des matières premières ou des produits entre plusieurs chaînes logistiques. En cas de pénurie due à des aléas, il faut en effet procéder à des arbitrages qui ne sont pas sans conséquence sur l'atteinte des objectifs liés aux clients ;
- La *gestion des données commerciales* qui reçoit les commandes et négocie les prix, quantités et délais de livraison souhaités ;
- La *gestion des données du travail* qui organise dans le temps la réalisation des opérations nécessaires à la fabrication des produits sur les ressources en prenant en compte les données techniques et commerciales ainsi que les retours du suivi de fabrication.

Devant l'étendue et la complexité des décisions qui constituent un processus de gestion de la production, le recours à une structure hiérarchisée devient incontournable. L'architecture décisionnelle d'une entreprise est alors divisée en trois niveaux de décision (figure I.3). Il s'agit des niveaux stratégique, tactique et opérationnel correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme [Anthony, 1965]. Cette *approche hiérarchisée* permet de décomposer le problème global en une succession de sous-problèmes et par la suite de réduire le nombre de variables pour chaque niveau de décision [Lopez, 1991].

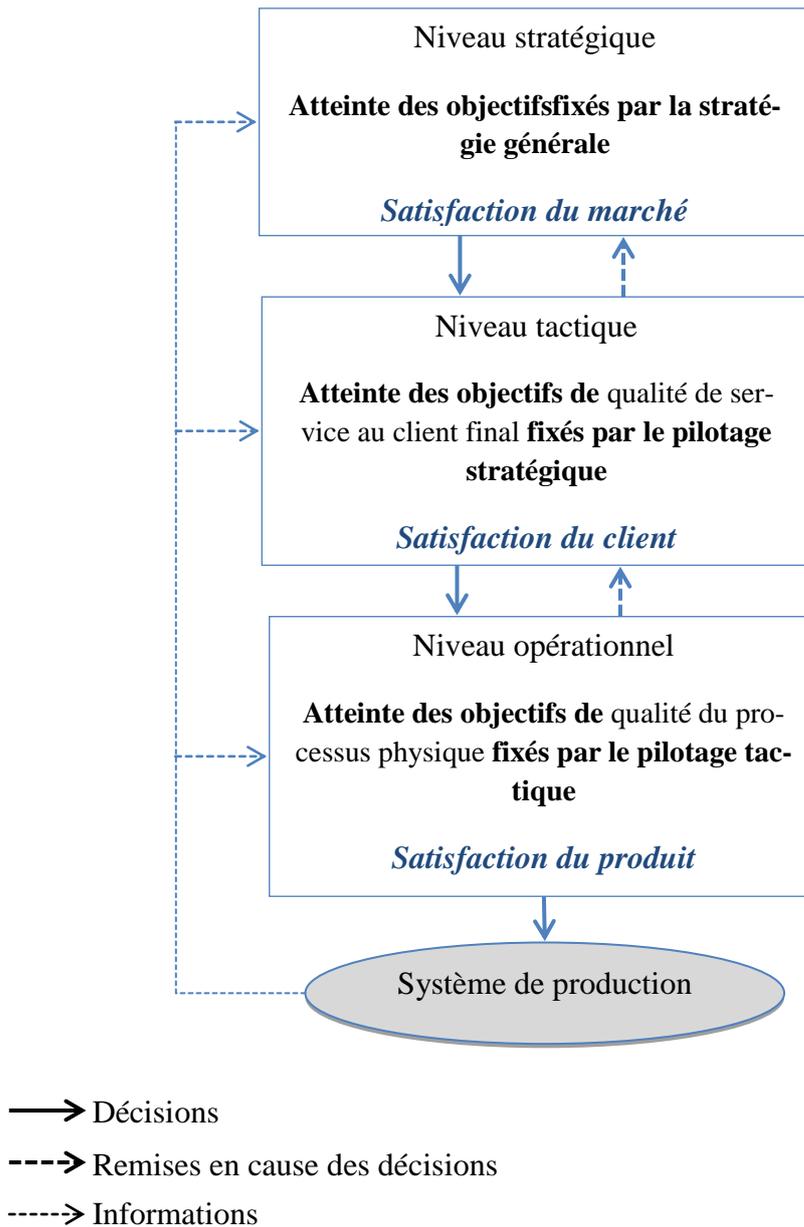


Figure I.3. Structure décisionnelle à trois niveaux [Dauzère-Pérès, 1992]

- Le *niveau stratégique* : Il concerne une vision à long terme. Les décisions à ce niveau sont de première importance et déterminent la politique majeure de l'entreprise. Prises par la direction générale de l'entreprise, elles concernent par exemple la mise au point des installations de production (la recherche de nouveaux partenaires industriels, la sélection des fournisseurs et sous-traitants, les décisions de positionnement de nouveaux sites ou de fermeture de certains sites ou leur délocalisation), la politique budgétaire, le choix du type de gestion de production (par ex. fabrication à la

commande, fabrication sur stock), le développement de nouveaux types de produits sont des décisions stratégiques ([Miller, 2001], [Galasso, 2007]).

- *Le niveau tactique* : Ce niveau définit les conditions de satisfaction de la demande des clients (exprimée sous forme de prévisions ou de commandes) sous contrainte de satisfaction de la stratégie de pilotage définie au niveau supérieur. Il correspond aux décisions politiques à moyen terme d'une entreprise (de quelques semaines à quelques mois). Ces décisions sont du ressort des cadres de l'entreprise et portent sur les problèmes liés à la gestion des ressources de l'entreprise. A ce niveau, les données sont aussi agrégées, mais avec un niveau de détail plus fin que pour le niveau stratégique. Ces décisions tactiques traitent, principalement, des objectifs de volumes à produire par période (la période de planification varie principalement entre une semaine et un mois). A ce niveau, l'optimisation se fait par la maximisation ou la minimisation d'une fonction économique (généralement associée à des coûts), en se basant sur les leviers décisionnels disponibles pour l'entreprise ([Shapiro, 1998]). Certaines perturbations, telles que des fluctuations possibles de la demande ou des aléas de production, viennent parfois aussi compliquer le problème. Les décisions à moyen terme consistent aussi en des directives pour la production détaillée.
- *Le niveau opérationnel* : Ce niveau assure le suivi et le contrôle du flux physique afin d'assurer la mise à disposition des produits par chaque maillon au maillon suivant, selon les conditions d'opérations définies au niveau tactique. A ce niveau, les décisions sont prises à court terme et à très court terme (hebdomadaire voire quotidien). Elles sont prises par les opérateurs de production. Les données sont ici beaucoup plus détaillées. La génération d'un plan détaillé de production et l'affectation des ouvriers sont, par exemple, des décisions du niveau opérationnel.

Ces niveaux décisionnels portent sur des horizons de temps, des niveaux de détail et des volumes de production différents. Plus le niveau de décision est élevé, plus l'horizon de temps est long, plus les données sont imprécises et plus les modèles associés sont agrégés [Giard, 2003]. L'approche hiérarchisée permet de simplifier le processus global de décision. En effet, chaque niveau de décision correspond souvent à différents décideurs dans les entreprises. Cependant, cette décomposition hiérarchique des décisions pose de multiples problèmes et rend incontournable le recours à une forte cohésion entre les acteurs des différents niveaux. Les décisions prises à un niveau deviennent des contraintes à satisfaire par les niveaux inférieurs. Il faut donc s'assurer que, lorsque des décisions sont transmises au niveau inférieur,

elles soient cohérentes avec les contraintes de ce niveau, c'est-à-dire qu'il soit possible de mettre effectivement en œuvre ces décisions [Wolosewicz, 2008].

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les niveaux tactique (planification) et opérationnel (ordonnancement).

I.2.3. Offres en logiciels pour la gestion de la production

Les technologies de l'information et les systèmes d'information associés ont fortement influencé l'évolution des systèmes de production dans l'implémentation d'outils support à la collaboration. Le volume important de données ainsi que les calculs considérables à réaliser ont été grandement facilités par l'augmentation de la capacité des ordinateurs. On trouve notamment : les outils désormais classiques de GPAO (gestion de production assistée par ordinateur), puis les ERP (Entreprise Resource Planning), les MES (Manufacturing Execution Systems), etc.

1.2.3.1. Les outils classiques de GPAO

L'objet des progiciels de GPAO 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 (gestion des données techniques, plans directeurs, calcul des besoins, ordonnancement, lancement, suivi des ordres de fabrication, gestion des stocks, gestion des achats et approvisionnements, calcul des coûts, etc.)* » [Gharbi, 2012]. Ces logiciels sont basés sur des approches classiques de planification des activités de production telles que le MRP (*Material Requirements Planning*) qui permet de calculer les besoins en composants sans capacité et le MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) qui intègre un système ajustant les niveaux de capacité.

- La méthode MRP a été développée aux Etats-Unis dans les années 1965-1970 pour pallier aux limitations de la gestion traditionnelle des stocks [Orlicky, 1975]. Elle consiste à planifier, à partir des demandes fermes des clients ou de leurs prévisions, les besoins en composants et les ordres de fabrication. Néanmoins, cette approche présente certaines limites relatives à l'absence de contrôle de la capacité de production du système dont on cherche à planifier l'activité. En effet, un plan de charge incompatible avec les capacités de production amènera à un lissage de la production de façon à ce que le plan de production proposé soit réalisable. En cherchant à ajuster

la charge souhaitée et la capacité disponible des postes de charge, une évolution vers une deuxième version de la méthode, MRP II, a été proposée.

- La méthode MRP II a été développée essentiellement pour ajuster la capacité de l'entreprise par rapport à la charge de production prévue. Etant donné que, dans la plupart des entreprises manufacturières, les décisions sont hiérarchisées comme on l'a vu ci-dessus, l'évolution vers MRP II a aussi permis une planification de la production depuis le long terme jusqu'au court terme [Courtois *et al.*, 1995]. Pour ce faire, elle met en œuvre une séquence de plans (figure I.4), généralement résumée par les cinq grandes étapes suivantes ([Vob et Woodruff, 2006], [Vollman *et al.*, 1997]) : le plan stratégique, le plan industriel et commercial (PIC), le plan directeur de production (PDP), la planification des besoins en composants (MRP) et le pilotage d'atelier.

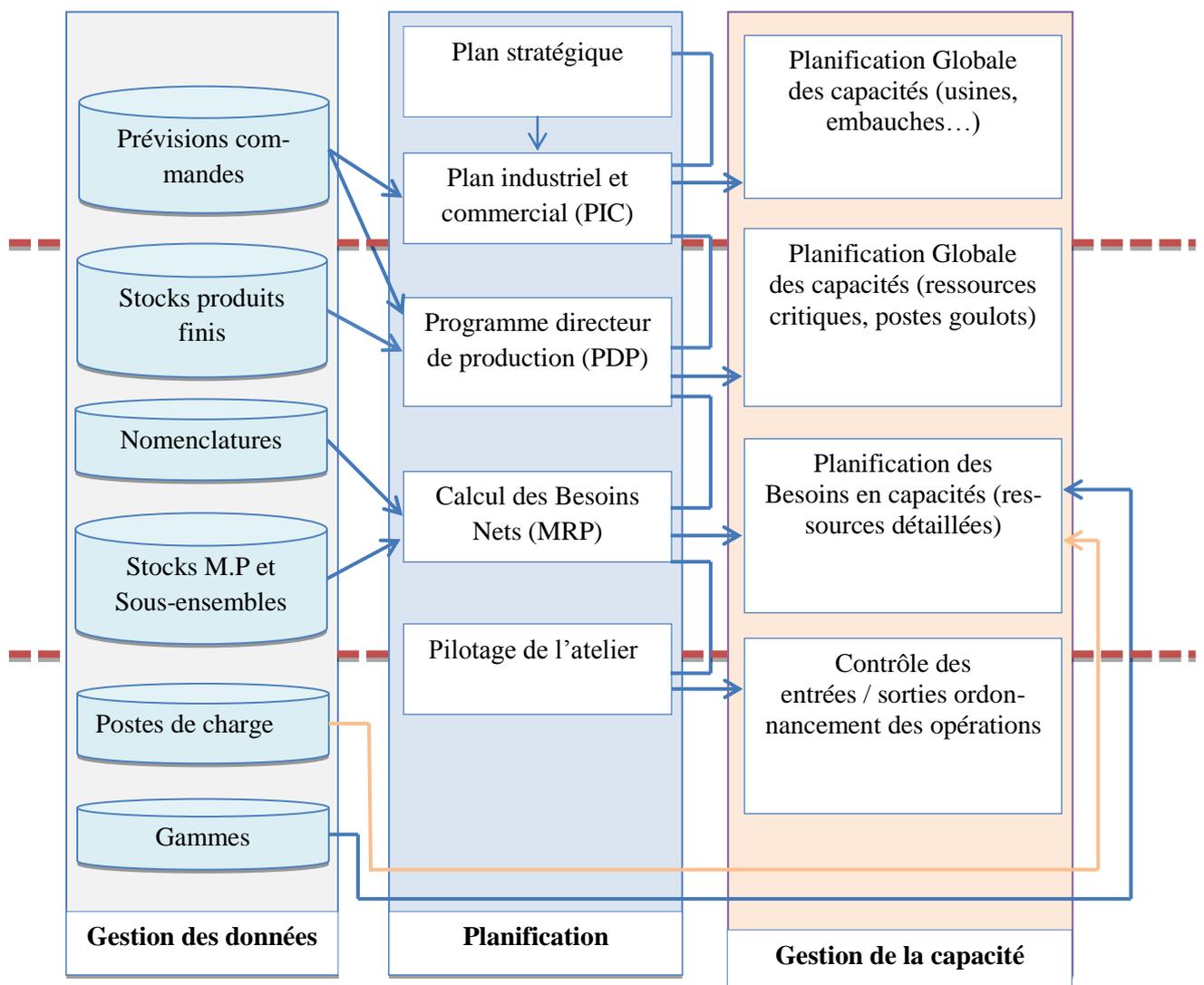


Figure I.4. Modélisation des décisions de planification dans le MRP II, d'après [Thomas, 2003]

Les plans calculés aux différents niveaux décisionnels (figure I.4) ont un horizon temporel spécifique et un certain niveau de détail des données manipulées. Ces plans sont affinés successivement d'un niveau à l'autre pour produire la planification opérationnelle de la production, souvent qualifiée de *pilotage d'atelier*. En effet, à chaque niveau, le plan calculé à capacité infinie doit être ajusté avec la capacité finie existante pour obtenir ainsi un plan réalisable qui servira ensuite de cadre de décision pour l'élaboration du plan de l'étape de niveau inférieur.

La généralisation du concept d'intégration de systèmes informatiques et des processus « métier » dans tous les domaines de l'entreprise a donné naissance aux ERP, extension du MRP II [Bourrières *et al.*, 2005].

1.2.3.2. Les progiciels ERP

Les ERP (Entreprise Resource Planning ou encore PGI en français pour Progiciels de Gestion Intégrée), développés dans les années 70 et répandus à partir des années 90, répondent à la problématique d'intégration et de synchronisation des informations de l'entreprise ([Monk, 2005], [Vob et Woodruff, 2006]). Ils permettent de gérer l'ensemble des processus d'une entreprise intégrant l'ensemble de ses fonctions comme la gestion des ressources humaines, la gestion financière et comptable, l'aide à la décision, la vente, la distribution, l'approvisionnement, la production ou encore du e-commerce. Un ERP est composé par un ensemble d'applications informatiques correspondant aux diverses fonctions citées précédemment de manière modulaire sachant que ces modules sont indépendants entre eux, tout en partageant une base de données unique et commune au sens logique. L'autre principe qui caractérise un ERP est l'usage de ce qu'on appelle un moteur de *workflow* qui permet, lorsqu'une donnée est enregistrée dans le système d'information, de la propager dans les modules qui en ont l'utilité, selon une programmation prédéfinie.

1.2.3.3. Les systèmes MES

Un *Manufacturing Execution System (MES)* est un système informatique dont les objectifs sont de collecter en temps réel les données de production de tout ou partie d'une usine ou d'un atelier. Ces données collectées permettent ensuite de réaliser un certain nombre d'activités d'analyse (traçabilité, contrôle de la qualité, suivi de production, ordonnancement, maintenance). Historiquement bien implantés dans les industries de type process, agro-

alimentaire et pharmaceutique en particulier (principalement pour des exigences de traçabilité), ces systèmes gagnent peu à peu d'autres secteurs d'activité, notamment les entreprises manufacturières. En permettant d'assurer le lien entre les deux systèmes informatisés existant dans l'entreprise, à savoir les systèmes comprenant les fonctions de gestion (*GPAO*, *ERP*, comptabilité...) et les systèmes de contrôle/commande assurant le pilotage en temps réel des ateliers de fabrication, les systèmes MES améliorent les activités de fabrication depuis l'ordre de fabrication jusqu'aux produits finis [Sakka, 2012].

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux niveaux tactique et opérationnel, plus particulièrement à la planification tactique et opérationnelle de la production. Très souvent, les décisions tactiques (Planification) sont prises indépendamment des décisions opérationnelles (Ordonnancement). Les contraintes de capacité de l'atelier sont modélisées grossièrement dans le calcul du plan, ce qui implique souvent la non faisabilité d'un plan de production. Pour pallier ce problème, nous proposons une approche hiérarchisée à deux niveaux de décision.

I.3. Modèles de Planification – Ordonnancement

La planification a pour objet de déterminer un programme prévisionnel de la production. Ces décisions imposent la prise en compte, au niveau de l'ordonnancement, de contraintes sur le processus de production (enchaînement des opérations de fabrication) et sur les ressources (contraintes de capacité).

Dans le cadre d'une approche hiérarchique ([Miller, 2001], [Fontan *et al.*, 2001]), on trouve essentiellement deux types de modèles associés respectivement à la planification et l'ordonnancement [Johnson et Montgomery, 1974] :

- les modèles par "quantité" qui consistent à déterminer des quantités de produits à fabriquer par période de temps,
- les modèles par "dates de début" qui consistent à déterminer les dates de début de tâches sur différentes ressources.

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le cadre générique de ces modèles (variables de décision et contraintes) ainsi que la typologie de chacun. Cette présentation est abordée indépendamment de la méthode de résolution.

I.3.1. Planification : modèles par quantités

La planification est une décision tactique qui permet une programmation prévisionnelle de la production en s'appuyant sur une démarche d'optimisation des moyens de production dans le but de satisfaire les demandes aux moindres coûts. Elle constitue un lien entre les décisions stratégiques à long terme et les décisions opérationnelles à court terme. La planification part de certaines informations telles que les demandes clients (connues ou estimées), la capacité de production (par unité de temps, atelier ou machine), les informations sur les produits, les différents coûts (production, lancement, non satisfaction des demandes, sous-traitance, utilisation d'heures supplémentaires, stockage, rupture de stocks ...). A ce niveau, le temps est divisé en intervalles de temps appelés périodes et les informations rassemblées permettent de définir des plans de production qui déterminent pour chaque période de l'horizon de planification, en général de quelques mois :

- les quantités à produire pour chaque produit,
- les quantités à sous-traiter pour chaque produit,
- les niveaux de stocks en produits finis,
- l'utilisation des ressources humaines et matérielles,
- le nombre d'heures supplémentaires.

Dans les modèles par quantités, le temps est divisé en intervalles de temps appelés périodes. Les variables de décision $x_{i,t}$ représentent les quantités de produits (et de sous-produits) i fabriquées pendant les périodes t . Les contraintes principales d'un problème de planification avec un modèle par quantités sont les suivantes [Thierry, 2003] :

- **les contraintes de succession:**

- les *contraintes de conservation* au niveau des stocks : $\forall i, \forall t, I_{i,t+1} = I_{i,t} + in_{i,t} - out_{i,t}$ avec $I_{i,t}$ la quantité de produit i en stock au début de la période t , $in_{i,t}$ la quantité de produit i arrivant dans le stock pendant la période t et $out_{i,t}$ étant la quantité quittant ce stock pendant cette même période ;
- les *contraintes de respect de la nomenclature*, en liaison avec les contraintes de conservation qui expriment le fait que, pour fabriquer un produit, il faut disposer de ses composants $out_{i,t} = \sum_{j \in S_i} g_{i,j} \cdot x_{j,t}$ avec $g_{i,j}$, la quantité de produit i nécessaire pour fabriquer un produit j et S_i la liste des produits j qui utilisent i .

- **les contraintes de capacité** : elles expriment la limitation des capacités des ressources. La ressource a une quantité $C_{r,t}$ disponible, exprimée en unités de ressources.temps (machines.heures par exemple), et on ne peut pas utiliser plus que cette quantité. $\forall i, \forall t, \sum_{i/j \text{ utilise } r} b_{r,i} * x_{i,t} \leq C_{r,t}, b_{r,i}$ étant la quantité de la ressource (exprimée dans la même unité que la capacité) utilisée pour la fabrication du produit i .
- **les contraintes de respect des dates de livraison** : elles expriment le fait qu'une date de livraison est imposée par le client : on livre à la date de livraison la quantité de produit commandée pour cette date : $out_{i,t} = d_{i,t}$ avec $d_{i,t}$ la quantité de produit i demandée pour la période t .

Les variantes de ce modèle constituent la famille des problèmes pléthoriques de dimensionnement de lots (*lot-sizing problems*). [Rota, 1998] présente une classification de ces modèles par quantités en fonction des niveaux de nomenclature, de la prise en compte des contraintes de ressources et de la demande (constante ou non) sur l'horizon de planification, comme le montre la figure suivante.

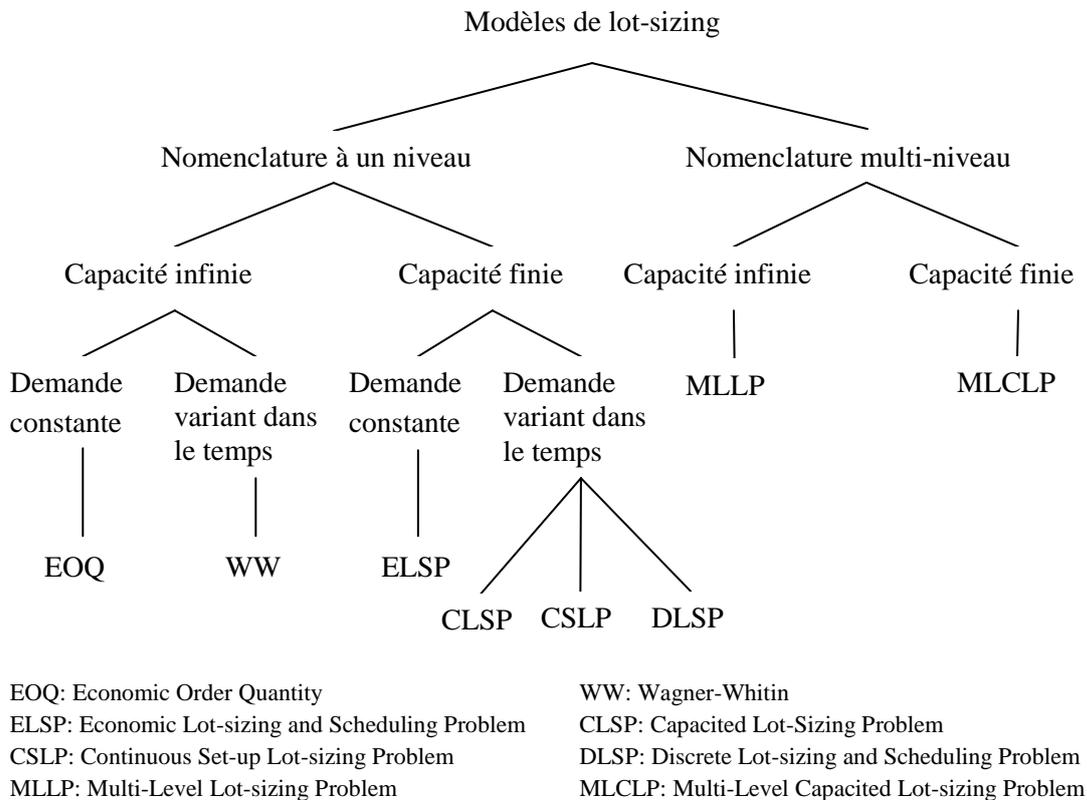


Figure I.5. Classification des modèles de lot-sizing [Rota, 1998]

La classe de problèmes qui nous intéresse est le *CLSP* ou *Capacited Lot-Sizing Problem*. Il s'agit de déterminer les quantités à fabriquer ($x_{i,t}$) pour les différents produits sur l'horizon de planification fini, de manière à satisfaire la demande en respectant les contraintes de capacité et minimiser un coût.

I.3.2. Ordonnancement : Modèles par dates

Résoudre un problème d'ordonnancement c'est trouver une adéquation entre un travail à effectuer, décrit sous la forme d'un ensemble de tâches interdépendantes, et les moyens disponibles pour sa réalisation [Esquirol et Lopez, 1999]. Il s'agira de produire les quantités (lots) déterminées à l'issue de la planification, dans les délais. Ces lots (ou ordres de fabrication) doivent traverser l'atelier de fabrication en subissant diverses opérations, dans un ordre fixe ou non afin d'obtenir des produits finis. Une opération (ou tâche) correspond au traitement d'un ordre de fabrication par une ressource. « *Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début* » [Gotha, 1993].

Les contraintes principales du problème d'ordonnancement sont les *contraintes de précedence* qui définissent l'ordre d'exécution des ordres de fabrication, les *contraintes de capacité* qui expriment le fait que, sur chaque ressource, on ne peut exécuter qu'un nombre limité de tâches simultanément et les *contraintes de respect des dates de livraison* données aux clients. Les problèmes d'ordonnancement sont aussi caractérisés par des fonctions objectif à optimiser, par exemple : la date de fin de fabrication d'un ordre de fabrication ou de l'ensemble des ordres de fabrication (makespan), le retard algébrique par rapport à la date de fabrication souhaitée, etc.

Dans les modèles par dates, les variables de décision sont les dates de début des tâches t_i sur les différentes ressources. On définit une tâche comme étant une quantité de travail concernant la fabrication d'un produit caractérisée par sa durée d'exécution p_i . Les contraintes principales du problème d'ordonnancement avec un modèle par dates sont les suivantes [Thierry, 2003] :

- *les contraintes de précedence* se traduisent de la manière suivante : $\forall i, \forall j, t_j - t_i \geq a_{ij}$ avec $a_{ij} = p_i$ pour les contraintes de succession.

- **les contraintes de capacité** qui expriment le fait que, sur chaque ressource, on ne peut faire qu'un nombre limité de tâches simultanément. Parmi ces contraintes, on distingue :
 - *les contraintes disjonctives* qui concernent les ressources de capacité unitaire, ce sont des contraintes du type “tâche i avant tâche j ” ou “tâche j avant tâche i ” qui s’expriment comme une disjonction de contraintes de potentiels : $t_i + p_i \leq t_j$ ou $t_j + p_j \leq t_i$;
 - *les contraintes cumulatives* dans le cas de ressources de capacité non unitaire. Il faut exprimer que, à chaque instant, les moyens nécessaires à l'exécution d'un certain nombre de tâches sont limités sur une unité de production. Ceci se traduit par la contrainte suivante : $\forall t, \forall r, \sum_i q_{i,t,r} \leq C_r$, $q_{i,t,r}$ étant la quantité de ressources utilisée pour l'exécution de la tâche i sur la ressource r à l'instant t et C_r la capacité de la ressource r .
- **les contraintes de respect des dates de livraison** : les dates de livraison données par le client doivent être respectées. Le modèle par dates de début exprime le fait que la date de fin d’une tâche doit être inférieure à la date échuée concernant cette tâche. Ce qui se traduit par des contraintes de type : $t_i + p_i \leq \beta_j$ avec β_j la date échuée de la tâche i .

Plusieurs classes de problèmes d’ordonnancement peuvent être envisagées. En effet, les ressources sont soit renouvelables soit consommables (figure I.6, [Lopez, 1991]). Dans le cas où elles sont renouvelables disjonctives, on définit un problème d’atelier (Ressource unique, Job shop, Flow shop, Open shop) et si elles sont renouvelables cumulatives, on définit un problème d’ordonnancement à ressources limitées (*RCPS*, *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*).

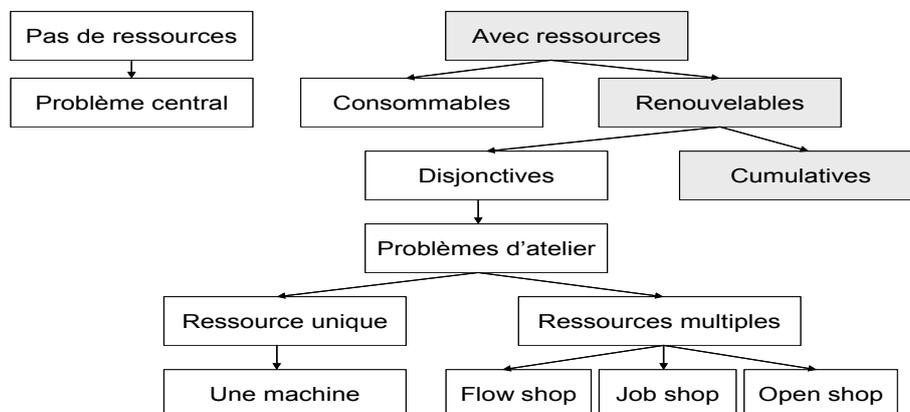


Figure I.6. Classification des problèmes d’ordonnancement: Modèles par dates [Lopez, 1991]

Ces modèles par dates de début peuvent être utilisés au niveau opérationnel comme au niveau tactique dans la mesure où ils permettent de considérer chaque ressource individuellement, ou aussi l'unité de production (Poste de charge, Site de production) comme un ensemble de ressources capables de dispenser globalement une certaine quantité de service. Toutefois, on atteint les limites de cette agrégation lorsqu'il s'agit de production en moyenne ou grande séries et que le dimensionnement des lots (des quantités) est au centre du problème. Dans ce cas, ces modèles ne sont utilisés qu'au niveau opérationnel (ordonnancement à court terme) et ils sont couplés avec un modèle par quantités pour les décisions à moyen terme (planification).

I.4. La Planification : un vecteur de hiérarchisation et d'intégration

Une vision hiérarchique de la planification au sein d'une entreprise est indispensable, car elle permet de savoir <qui fait quoi> et de décliner les objectifs verticalement sur les niveaux. Mais celle-ci, seule, ne permet pas à la planification d'être pilotée efficacement. Elle devra être complétée par une vision horizontale intégrant la notion client/fournisseur. Cette vision s'appuiera essentiellement sur la mise en œuvre d'une démarche processus, démarche transverse focalisée plus particulièrement sur les bénéficiaires <pour qui>le travail est réalisé.

Dans ce paragraphe, nous présentons en première partie les approches multi-niveaux de la planification. Elles décrivent les structures décisionnelles liées à la planification et l'ordonnancement. En deuxième partie, nous présentons la vision verticale de la planification.

I.4.1. Les approches multiniveaux : supports de la hiérarchisation verticale

La complexité du problème de gestion de la production liée à un grand nombre de données à traiter a conduit à des programmes mathématiques de grande taille. Cette complexité importante explique le recours à l'utilisation de méthodes de décomposition issues de la programmation mathématique ou bien encore les techniques d'agrégation-désagrégation développées en optimisation mathématique [Fontan *et al.*, 1997].

L'utilisation des structures multi-niveaux permet alors de réduire la complexité du modèle réduisant ainsi le temps de calcul associé à sa résolution. Cependant, cette procédure hiérarchisée n'est souvent pas cohérente [Wolosewicz, 2008]. En effet, la planification et l'ordonnancement sont deux modules traités habituellement indépendamment l'un de l'autre. En effet, les modèles de planification tiennent compte des contraintes de capacité de façon

trop agrégée et ne garantissent pas la faisabilité du plan de production lorsqu'il est transmis au niveau inférieur. Une conséquence de ces incohérences entre les décisions des deux niveaux est le non respect des délais qui devient une attente de plus en plus forte de la part des clients.

Dans sa thèse, Hernandez Silva [Hernandez Silva, 2008] indique que les travaux de recherche dans le domaine de la mise en œuvre des structures décisionnelles peuvent se diviser en trois grandes classes : la planification hiérarchisée de la production, l'ordonnancement hiérarchisé de la production et l'intégration de la planification et l'ordonnancement. Nous présentons dans la suite les approches hiérarchisées de planification, les approches hiérarchisées d'ordonnancement ainsi que les approches intégrées de planification-ordonnancement.

1.4.1.1. Approches hiérarchisées de planification et d'ordonnancement

La décomposition hiérarchique du problème global a été largement adoptée par plusieurs auteurs. Cette décomposition s'appuie sur une structure décisionnelle hiérarchique où la solution obtenue par un niveau constitue une contrainte pour la résolution du problème au niveau inférieur. Elle consiste en des raffinements successifs de décisions (désagrégation des décisions). Au sommet de la hiérarchie, les données manipulées sont agrégées et les horizons temporels sont longs. Plus on descend dans la hiérarchie, plus les horizons temporels se raccourcissent et les données manipulées sont détaillées. Ces approches sont souvent associées à des mécanismes d'agrégation.

i. Agrégation des données

Le concept d'agrégation est généralement défini comme une forme d'abstraction par laquelle un ensemble de données ou de variables présentant des caractéristiques communes peut être remplacé par une donnée ou une variable agrégée [Fontan *et al.*, 1997]. Nous distinguons une agrégation sur les matières qui vise à regrouper des produits ou des ressources ne se différenciant que par des caractéristiques jugées secondaires, en familles de produits ou en familles de machines, une agrégation sur le temps qui permet de regrouper un ensemble de périodes élémentaires consécutives dans une macro-période et une agrégation du travail qui permet de représenter différentes tâches élémentaires devant se succéder par une macro-tâche [Hernandez Silva, 2008].

ii. Planification hiérarchisée de la production

Nous trouvons la planification hiérarchisée de la production dans un grand nombre de travaux. L'une des toutes premières en planification hiérarchisée est l'approche de Hax et Bitran basée sur une agrégation des produits en types et familles [Bitran et Hax, 1977]. Un premier regroupement en famille est effectué pour les produits ayant des gammes de fabrication similaires et un second regroupement en type pour les familles ayant le même coût unitaire de production, le même coût de stockage et la même demande externe. La première étape de planification est réalisée moyennant une résolution par programmation linéaire. La capacité de production dans cette première étape est allouée aux différents types de produits. En deuxième étape, une désagrégation est effectuée sur la première période de l'horizon de planification. Pour chaque type, la production est répartie en familles. En troisième et dernière étape, la production de chaque famille est répartie entre les articles de sa famille.

D'autres approches à deux niveaux basées sur une agrégation des produits existent. Nous pouvons citer par exemple les travaux de [Tsubone *et al.*, 2002] et [Ashayeri et Selen, 2003]. [Mehra *et al.*, 1996] propose aussi une structure du même type (à deux niveaux) où les produits sont agrégés en familles de produits, les machines en cellules et le temps en périodes.

Mercé [Mercé, 1987] propose une approche de planification hiérarchisée à deux niveaux fondée sur une agrégation homogène des produits. La planification agrégée permet de définir, à chaque période et pour chaque produit agrégé, la quantité à produire de façon à satisfaire la demande agrégée et en minimisant les coûts associés à ce niveau. Elle est effectuée sur un horizon glissant découpé en périodes. La planification détaillée permet de répartir la production agrégée entre les différents produits d'une même classe, en vue de satisfaire la demande détaillée.

Récemment, Gharbi [Gharbi *et al.*, 2009] a proposé une approche fondée 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 est formulé selon un programme linéaire. Au niveau agrégé, le modèle prend en compte les spécificités du processus décisionnel détaillé.

iii. Ordonnancement hiérarchisé de la production

La plupart des travaux dans cette classe d'approches hiérarchisées s'inscrivent dans le domaine des systèmes informatiques [Wolf et Chen, 1995]. Cependant, nous trouvons quelques approches d'ordonnancement hiérarchisé dans le domaine des systèmes de production. Une agrégation sur les ressources est généralement appliquée. Dans ce cadre, nous citons par exemple les travaux de [Hernandez Silva, 2008]. Il propose une structure hiérarchisée où le *niveau supérieur* établit un *macro-ordonnancement* qui permet de positionner les ordres de fabrication et des opérations sur des périodes de manière à satisfaire au mieux les niveaux décisionnels retenus sur le moyen terme. Le niveau inférieur est chargé de réaliser un ordonnancement détaillé en positionnant finement (temps continu, horizon court-terme) les opérations de fabrication sur les ressources. Il est chargé de suivre au mieux le macro-ordonnancement généré par le niveau supérieur de décision ; voir aussi [Tsukiyama *et al.*, 1998] ou [Tung *et al.*, 1999] et les travaux de [Fontan *et al.*, 2005]. Dans la suite, nous présentons quelques approches de la littérature qui s'inscrivent dans le cadre des approches intégrées de planification et d'ordonnancement.

1.4.1.2. Approches intégrées de planification/ordonnancement

Dans ces approches intégrées de planification et d'ordonnancement, le niveau supérieur détermine les tailles des lots et les niveaux inférieurs sont chargés de l'ordonnancement et de l'affectation des opérations sur les ressources ou les lignes de production. Etant donné la complexité posée par l'intégration de la planification et de l'ordonnancement, peu de recherches ont été faites dans ce domaine. Cette complexité est essentiellement relative à la taille des problèmes. Nous présentons dans ce qui suit diverses approches proposant l'intégration de niveaux hiérarchiques de décision existant dans la littérature.

A partir d'un modèle hiérarchisé à deux niveaux, [Fontan et Imbert, 1985] ont développé une approche intégrée qui permet d'obtenir un plan de production sur un horizon prédéfini, et faisable sur la première période de cet horizon. Le premier niveau (niveau planification) génère un plan de production sur un horizon discrétisé en périodes, et un deuxième niveau (niveau ordonnancement) permet de vérifier si, à la première période, il correspond un ordonnancement satisfaisant ce plan. Cette méthode garantit la faisabilité du plan pour la première période de l'horizon. Les décisions générées par le premier niveau de décision seront remises en cause dans le cas où, au niveau inférieur, il n'existe pas d'ordonnancement

faisable pour la première période. Cette remise en cause est traduite par une augmentation du nombre d'heures de production de la première période ou une diminution du volume de fabrication dans cette même période. La procédure itérative prend fin à l'obtention d'un plan faisable (figure I.7).

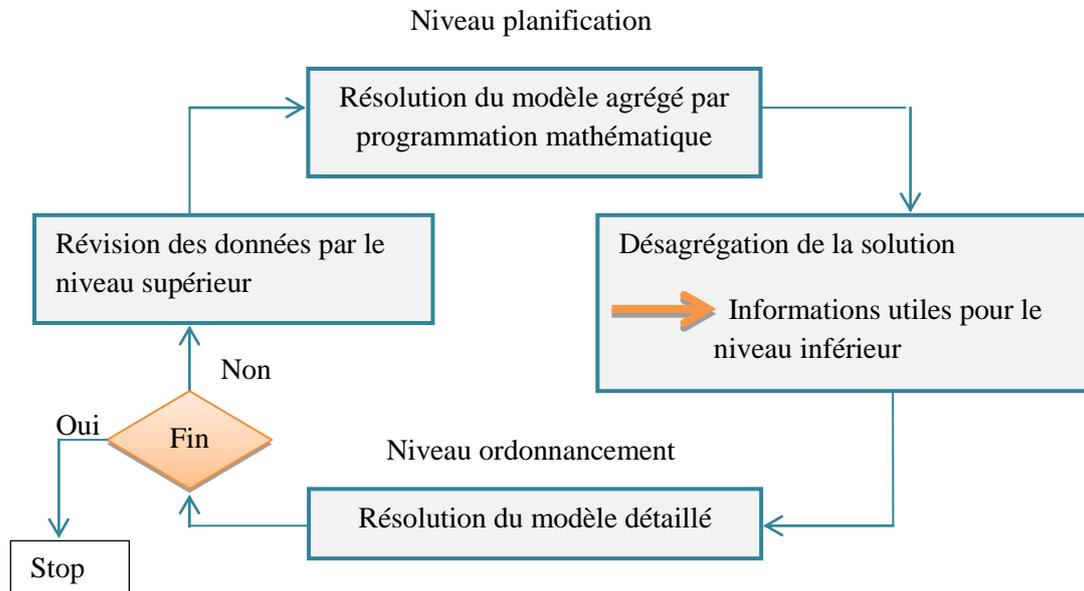


Figure I.7. Procédure itérative [Fontan et Imbert, 1985]

Plus récemment, [Van Wassenhove et Potts, 1991] présentent un modèle général où les décisions liées au *batching* (regroupement en lots de production) et au *lot-sizing* (détermination de la taille des lots) doivent être prises simultanément avec celles définissant un ordonnancement. Le but est de mieux ordonnancer la production pour un plan déjà fixé pour des ateliers de type *flow-shop* et *open-shop*. Cependant, ils ne proposent aucune méthodologie permettant de résoudre ce problème.

Dans la suite, nous présentons d'autres approches intégrées classées par leur méthode de résolution. Dauzère-Pérès et Lasserre ont développé un modèle et une méthode de résolution pour le problème global de planification et d'ordonnancement. L'approche développée permet de traiter de façon simultanée la planification et l'ordonnancement d'un atelier de type *job-shop* et garantit de plus la faisabilité du plan de production au niveau ordonnancement. Ils proposent un modèle intégré qui prend en compte les décisions de séquence et en considérant la capacité au niveau de l'ordonnancement ([Dauzère-Pérès *et al.*, 1994], [Dauzère-Pérès *et al.*, 2002]).

- Le niveau tactique génère, à partir des demandes clients, un plan de production. Ce niveau assure qu'il existe un ordonnancement pour exécuter ce plan.
- Le niveau opérationnel génère un ordonnancement à partir du plan de production calculé précédemment.

Les auteurs proposent une procédure itérative (cf. [figure I.7](#)) où ils alternent entre :

- la résolution optimale du module planification pour une séquence fixée des opérations (les contraintes de capacité sont exprimées pour une *séquence fixée* y de passage des produits sur les machines). Le plan calculé est faisable au moins pour l'ordonnancement utilisant la séquence y sur les machines. Le modèle est résolu par *Programmation Linéaire* ;
- la résolution du module ordonnancement pour un *plan de production fixé*. Il s'agit de trouver une séquence y' meilleure que la séquence y qui a permis de le calculer. Ce problème est résolu en utilisant *une heuristique* et ceci pour des raisons d'efficacité.

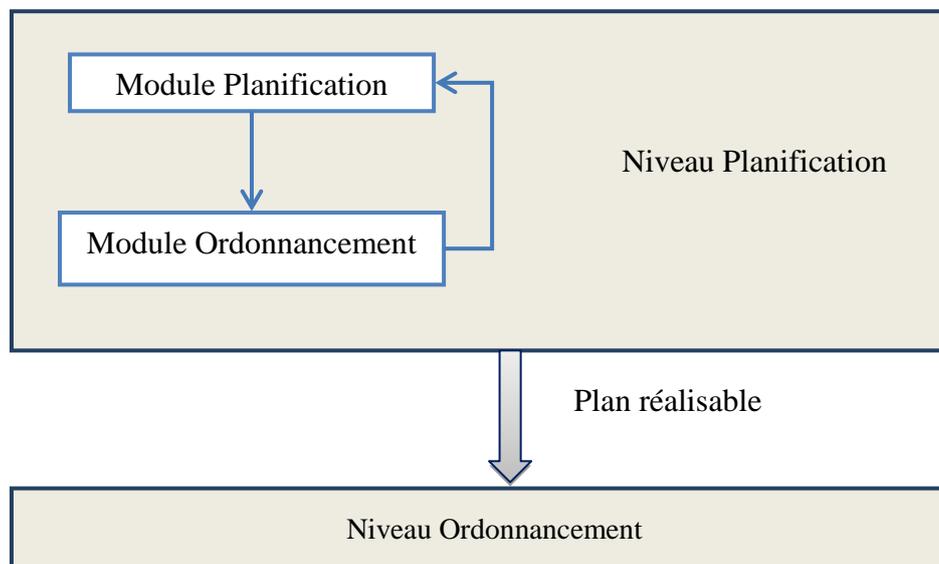


Figure I.8. Méthode de résolution intégrée de Dauzère-Pérès [Wolosewicz, 2008]

Cette méthode reste limitée en particulier dans le module planification : associer des variables binaires aux coûts et temps de lancement rend le modèle difficile à résoudre par un logiciel standard de programmation linéaire (CPLEX, XPRESS-MP, ...), tout en maintenant des temps de calcul acceptables.

[Sikora *et al.*, 1996] proposent une approche intégrée de planification et d'ordonnancement qui résout le problème période par période sur tout l'horizon de planification. Ils adoptent une procédure itérative entre le problème de séquencer des opérations sur les ressources et celui de la détermination de la taille des lots pour une machine goulet. La procédure utilise une heuristique modifiée de Silver-Meal jusqu'au moment où la capacité est utilisée au maximum.

[Giglio et Minciardi, 2002] décrivent aussi une approche intégrée pour la planification et l'ordonnancement. Le modèle qu'ils proposent est formulé par deux types de variables de décision : les variables continues pour le problème de dimensionnement de lots et les variables binaires pour la séquence des opérations sur les ressources. Toutes les variables binaires sont fixées et par la suite leur modèle est résolu à l'aide d'un outil standard de programmation linéaire.

[Yan *et al.*, 2004] propose une structure à deux niveaux où le niveau supérieur détermine un plan grossier de la production par un programme mathématique alors que le niveau inférieur réalise un ordonnancement à l'aide d'algorithmes de type tabou.

[Timpe, 2004] développe un modèle de planification et d'ordonnancement intégré pour lequel il propose deux méthodes différentes de résolution, chacune d'elle correspondant à un niveau de décision. Le problème de dimensionnement de lots tenant compte du lancement de la production est résolu à l'aide d'un programme linéaire en variables mixtes et ceci en appliquant une procédure par séparation et évaluation. Ensuite, la programmation par contraintes a été utilisée pour la résolution du problème de séquençement. A une itération i de la procédure par séparation et évaluation, les produits sont affectés aux machines pour la période courante et le problème de séquençement est résolu. Les informations relatives au lancement de production sont transmises au programme linéaire pour la résolution des périodes suivantes.

Dans sa thèse, [Wolosewicz, 2008] a utilisé le modèle proposé par Dauzère-Pérès et Lasserre comme modèle de départ pour son étude. Elle a ensuite proposé un nouveau modèle intégré de planification et d'ordonnancement qui permet de déterminer un plan de production pour un ordonnancement fixé. Le modèle prend en compte les contraintes classiques de planification (contraintes d'équilibre de stocks, contraintes liant les variables de production et les variables de lancement, minimisation de l'ensemble des coûts). Pour modéliser les contraintes correspondant à l'ordonnancement, elle a supposé que la séquence des opérations sur les machines est fixée (le graphe conjonctif associé est connu). Les contraintes de capacité

sont alors modélisées par les chemins du graphe conjonctif. Le nouveau modèle développé permet de calculer un plan de production pour une séquence des opérations fixée. Une heuristique lagrangienne a été appliquée pour la résolution du problème. Une borne inférieure du problème est calculée par la relaxation lagrangienne et une nouvelle heuristique de lissage de la production pour construire une solution réalisable et ainsi obtenir une borne supérieure.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une approche intégrée de planification et d'ordonnancement où le premier niveau de décision s'intéresse à la planification de la production à moyen terme. Cela consiste à planifier les volumes de produits à traiter, pour chaque produit, ainsi que les volumes de production sous-traités et le nombre d'heures supplémentaires utilisées à chaque période de l'horizon. Le deuxième niveau est associé à un ordonnancement agrégé. Cela consiste à planifier pour chaque site de production, sur un horizon de planification discrétisé en périodes plus courtes, les dates de début des opérations de fabrication tout en respectant la limitation de la capacité des ressources de fabrication (nombre de machines notamment).

I.4.2. Les processus de planification : supports de l'intégration horizontale

Pour rappel, un processus est « l'ensemble des activités reliées entre elles par des flux d'informations significatives et qui se combinent pour fournir un produit matériel ou immatériel important et bien défini » [Lorino, 1995]. Depuis une vingtaine d'années, l'entreprise a commencé à étudier et à manager ces processus. Les différentes évolutions et méthodes organisationnelles (*Norme ISO 9001*, *BPR*¹, *chaîne logistique*, *Modèle SCOR*², etc.) et informatiques (*ERP*, *ECR*³, *CPFR*⁴, *BPM*⁵, etc.) ont conduit les managers à identifier et à définir leur organisation sous forme de processus.

Dans ce contexte, la planification doit non seulement intégrer ses objectifs locaux de production au sein de ses décisions, mais aussi prendre en considération et coopérer avec les

¹BPR : *Business Processus Reengineering*, une remise en cause fondamentale et une redéfinition radicale des processus opérationnels pour obtenir une amélioration spectaculaire des principales performances en matière de coûts, de délai, de service et de qualité [Hammer et Champy, 1993].

²SCOR ; *Supply Chain Operations Reference model*, modèle composé de quatre niveaux, décrit les processus clés présents dans chaque entreprise au sein de la chaîne logistique.

³ECR : *Efficient Customer Response*, cadre collaboratif garantissant les liens et les enchaînements entre production, gestion des stocks, distribution et processus en contact avec le client de manière totalement continue.

⁴CPFR : *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*, cadre collaboratif désignant une démarche impliquant entreprise et fournisseur dans l'établissement de programmes d'approvisionnement fondés sur l'élaboration conjointe de prévisions des ventes.

⁵BPM : *Business Processus Management*, démarche portant sur la modélisation, l'automatisation, la gestion et l'optimisation des processus métiers de l'entreprise.

activités amont et aval. La planification est ainsi amenée à être un support d'intégration et de coordination dans le cadre de l'approche processus de l'entreprise.

Nous rappelons ici une classification des tâches de planification sur les quatre processus principaux d'une entreprise que sont : l'approvisionnement, la production, la distribution et la vente. Cette classification sous forme de matrice Processus / Niveaux de décision est proposée par [Stadtler et Kilger, 2005] (figure I.9).

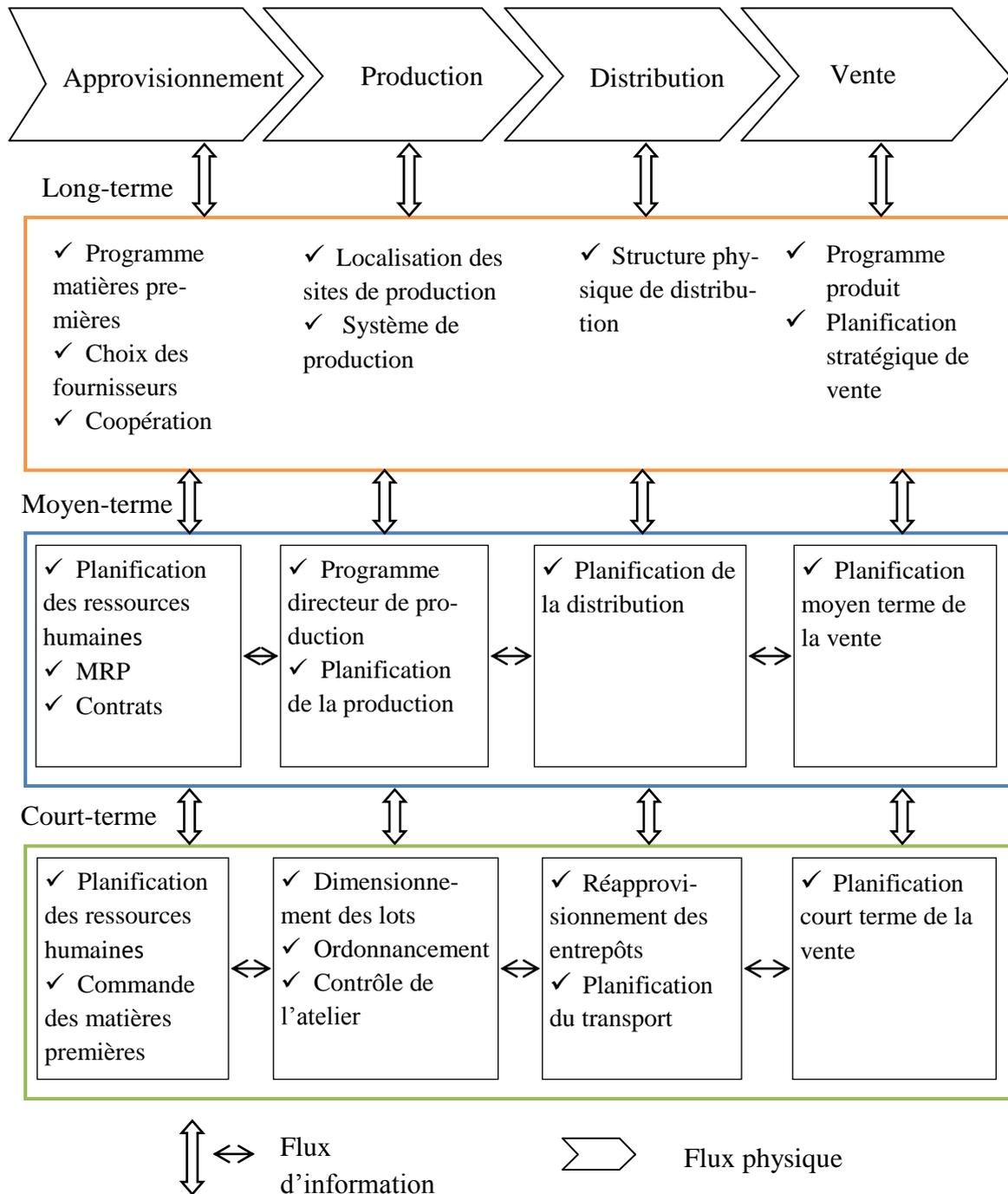


Figure I.9. SCP-Matrix [Stadtler et Kilger, 2005]

1.4.2.1. Le processus Approvisionnement

Le processus d'approvisionnement est l'ensemble des opérations qui permettent à l'entreprise de se procurer à l'extérieur tous les produits indispensables à la réalisation de ses activités de production. Il engendre deux activités intimement liées.

La première activité est un choix sélectif des fournisseurs de l'entreprise. Ce choix peut se faire sur différents critères comme la qualité, le prix, les délais de réapprovisionnement des matières premières ou composants, mais aussi leur capacité de production, leur facilité à accepter une demande très variable, les conditions de livraison... La seconde activité du processus Approvisionnement consiste à passer les commandes des composants aux fournisseurs sélectionnés en fonction de la production à réaliser.

1.4.2.2. Le processus Production

Le processus Production concerne l'ensemble des activités permettant de transformer des matières premières en produits finis. L'objectif du processus Production est d'assurer la fabrication des produits requis tout en assurant la productivité de manière à être compétitif. La productivité est traduite par la capacité à produire dans un délai donné le plus possible de produits d'une qualité spécifiée, avec un coût de revient le plus faible possible. Les méthodes utilisées pour la gestion de la production cherchent à améliorer le flux des produits dans les ateliers de fabrication à travers la planification et l'ordonnancement.

1.4.2.3. Le processus Distribution

Le processus Distribution concerne la livraison des produits finis aux clients et reprend les questions d'optimisation des réseaux de distribution : l'organisation et le choix des moyens de transport, le choix du nombre d'étages (ou d'intermédiaires) dans le réseau de distribution ainsi que le positionnement des entrepôts et leur mode de gestion [François, 2007].

1.4.2.4. Le processus Vente

Le processus de vente, géré par le service commercial, comprend diverses activités de l'entreprise, commençant par la commande du client jusqu'à la livraison du produit et l'établissement de la facture. Cependant, il exclut la fabrication du produit au sens large. Le processus de vente comprend aussi la détermination du prix, du délai et la rédaction du devis.

Les aspects marketing (analyse de marché, publicité, promotions, ...) sont aussi gérés dans ce processus.

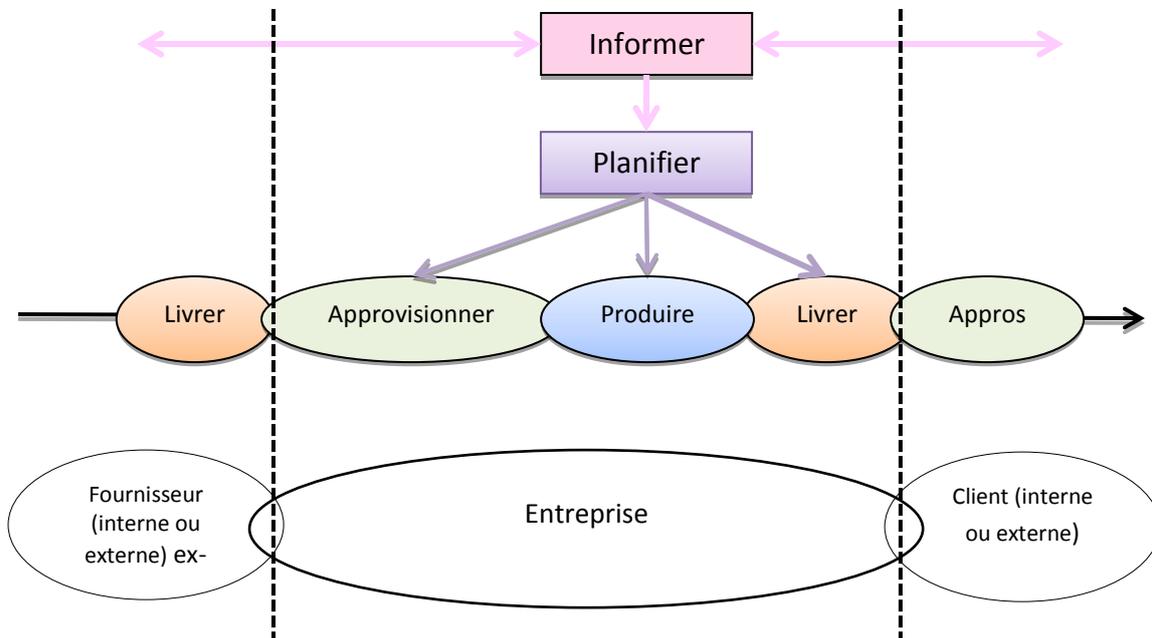


Figure I.10. La planification : support d'intégration horizontale

Ainsi, l'orientation processus a pour but d'améliorer la coordination et l'intégration de l'ensemble des activités liées à l'approvisionnement, la fabrication et à la commercialisation des produits. La coordination concerne la gestion des flux physique et informationnel véhiculés par ces processus. Elle repose sur l'utilisation des nouvelles *technologies de l'information et de la communication* qui permettent de véhiculer et de traiter l'information entre les différents processus.

[Bourrières *et al.*, 2005] soulignent que « *la mondialisation des marchés, concernant aussi bien la clientèle que la concurrence ou les offreurs de technologie, devient une réalité pour la plupart des entreprises manufacturières. Pour y faire face, les entreprises tendent à s'allier à des fournisseurs, co-traitants ou entreprises clientes au sein de réseaux de partenariat* ». Par exemple, dans une relation client-fournisseur, le processus Vente de l'entreprise « fournisseur » est en relation directe avec le processus Achat de l'entreprise « client ». C'est dans ce contexte de relations inter-entreprises qu'est apparue une nouvelle structuration en réseau des entreprises, connue sous le nom de « Chaîne Logistique ».

I.5. La chaîne logistique

La chaîne logistique est un champ d'étude important qui a donné lieu à une littérature très abondante. Il n'y a pas une définition universelle de ce terme. Nous citons ci-dessous quelques définitions, issues de la littérature scientifique.

Relativement au rôle que joue une chaîne logistique dans le processus de transformation d'un produit, certains auteurs ([Lee et Billington, 1993], [Rota-Frantz *et al.*, 2001], [La Londe et Masters, 1994]) assimilent une chaîne logistique à 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 (cf. [figure I.11](#)).

[Tayur *et al.*, 1999] définissent une chaîne logistique pour un produit donné comme 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.

Pour d'autres ([Mentzer *et al.*, 2001], [Génin, 2003], [Stadtler et Kilger, 2000]), la chaîne logistique est centrée sur l'entreprise. Elle est définie comme 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.

Parmi les différentes définitions, celle de Lee et Bellington nous semble la plus adaptée à notre problématique : « *Une 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* » [Lee et Bellington, 2003].

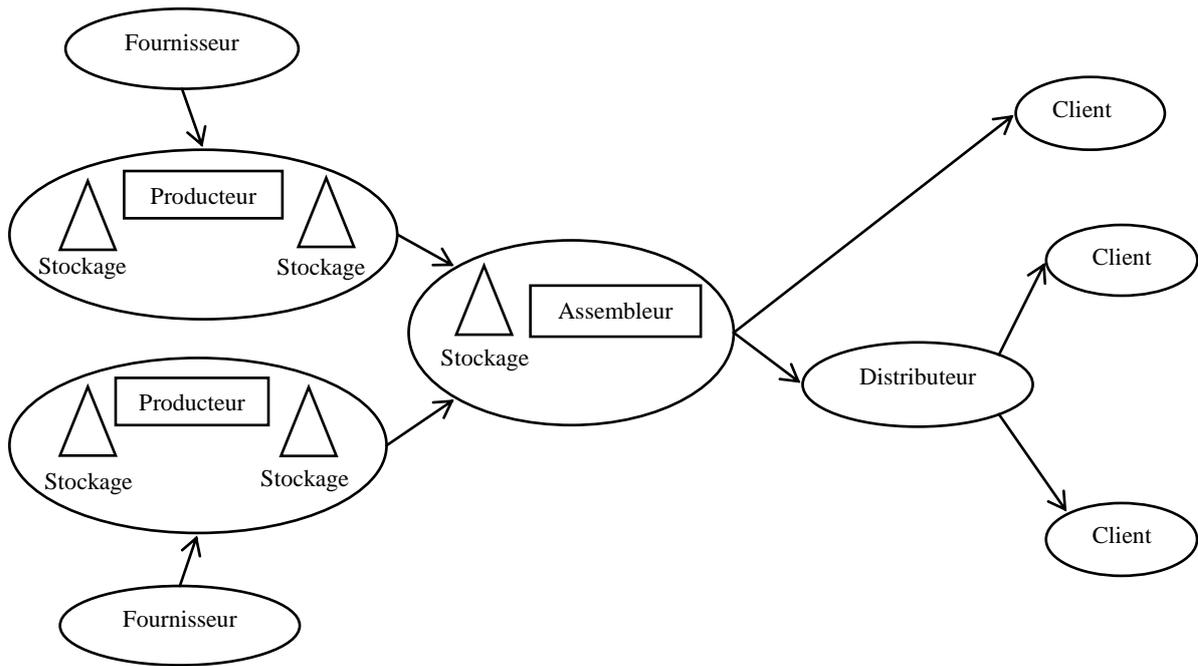


Figure I.11. Représentation d'une chaîne logistique [Lee et Billington, 1993]

I.5.1. Structure des chaînes logistiques

Il est important d'identifier une structure qui permet de caractériser les entités qui interagissent pour former une chaîne logistique [Mahmoudi, 2006]. Toutefois et vu la grande variété des types de fabrication et des périmètres des chaînes, il est difficile de cerner l'ensemble des cas réels des structures des chaînes logistiques [Galasso, 2007]. Dans la littérature scientifique, on distingue un ensemble de typologies usuelles, sur lesquelles sont fondées les modélisations existantes. [Huang *et al.*, 2003] décomposent par exemple, ces structures en : série, dyadique, divergente, convergente et réseau. Les structures de base (figure I.12) sont présentées ci-dessous :

- La structure *série* : Elle correspond à un procédé de fabrication linéaire et vertical. Cette structure peut être utilisée, par exemple, pour étudier l'influence de la propagation de l'information sur l'ensemble de la chaîne [Galasso, 2007].
- La structure *dyadique* : Elle peut être vue comme un cas particulier d'une chaîne logistique en série, limitée à 2 étages. Elle peut servir de base à l'étude de relations client/fournisseur ou donneur d'ordre/sous-traitant ([Huang *et al.*, 2003], [Galasso, 2007]).

- La structure *divergente* : Elle permet de représenter un réseau de distribution où la matière part d'un point unique et se distribue à travers la chaîne. L'industrie électronique est un bon exemple de ce type de chaîne. Un exemple de configuration possible sera composé par un fournisseur de cristaux de silicium, les clients de rang 1 sont des constructeurs de puces, les clients de rang 2 sont des constructeurs de circuits intégrés et des assembleurs de téléphones mobiles en ce qui concerne le rang 3 [François, 2007].
- La structure *convergente* : Elle permet de modéliser un processus d'assemblage. Dans une chaîne convergente, la matière qui circule entre les sites converge vers un seul et même site qui est logiquement le lieu d'assemblage final. L'industrie automobile est un bon exemple de ce type de chaîne. Une usine de construction de voitures aura des fournisseurs d'équipements (carrosserie, siège, pare-brise, ...) dans le rang 1, des fournisseurs de textile (pour les sièges, ...) dans le rang 2, etc. [François, 2007].
- La structure *réseau* : Elle est une combinaison des deux structures précédentes. Elle permet de considérer à la fois les aspects approvisionnements et distribution, mais peut s'avérer plus complexe par le nombre d'acteurs impliqués, en particulier pour des produits complexes. [Lambert et Cooper, 2000] et [Min et Zhou, 2002] proposent de classer les acteurs en deux catégories (membres essentiels et membres secondaires) tels que les membres essentiels sont ceux qui contribuent à l'élaboration du produit. Afin d'optimiser le réseau, ils proposent de se concentrer sur les membres essentiels et même sur certaines relations uniquement notamment les fournisseurs les plus critiques. La structure réseau concerne par exemple l'industrie automobile dont, la partie amont est plutôt convergente alors que la partie aval est divergente.

[François, 2007] indique que «*la topologie d'une chaîne logistique est généralement de type « réseau », avec des ramifications plus ou moins grandes. En effet, une structure purement convergente signifie l'absence des réseaux de distribution pour la vente des produits. De même, une structure purement divergente est improbable, car cela signifierait que le produit fini ne découle que d'un fournisseur amont... »*.

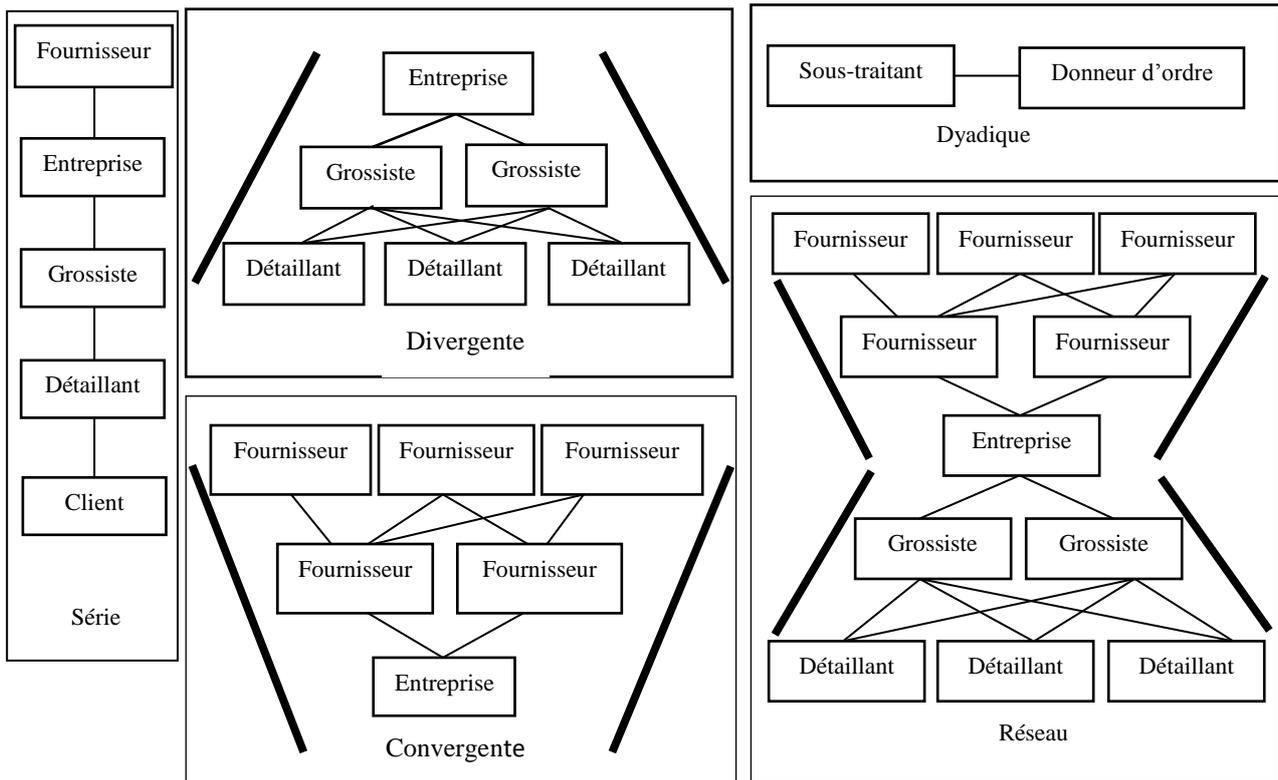


Figure I.12. Différentes structures de la chaîne logistique, [Mahmoudi, 2006]

En plus de cet aspect structurel, les objectifs liés à la création de relations de partenariat donnent lieu à une terminologie bien particulière [Jagdev *et al.*, 2003]. Nous présenterons dans le paragraphe suivant quelques grandes catégories de réseaux d'entreprises-partenaires en fonction des objectifs de ces groupements.

I.5.2. Catégories des chaînes logistiques

On distingue principalement trois formes d'entreprises-partenaires qui constituent des chaînes logistiques:

- *L'entreprise étendue* : Elle désigne un partenariat durable entre plusieurs entreprises organisées, dans plusieurs cas, autour d'un grand donneur d'ordres et cela pour faire face à la concurrence dans le marché ;
- *L'entreprise virtuelle* : Elle désigne un réseau d'entreprises géographiquement dispersées et juridiquement indépendantes collaborant dans le but d'atteindre un objectif auquel elles n'auraient pu répondre seules. La caractéristique majeure de ce type d'entreprise est qu'elle représente un réseau collaboratif temporaire. La

durée de vie de cette collaboration est limitée à celle du marché visé ([Galasso, 2007], [Gharbi, 2012]). L'intérêt de ces entreprises virtuelles est donc de pouvoir cumuler les savoir-faire spécifiques des entreprises pour gérer la totalité du cycle de vie du projet (en incluant les phases de définition, conception, fabrication/réalisation, commercialisation, marketing...) [Nayak *et al.*, 2001].

- L'entreprise *multi-sites*. Elle fait référence à des entreprises dont la production est répartie sur plusieurs sites distingués géographiquement (cf. [figure I.13](#)).

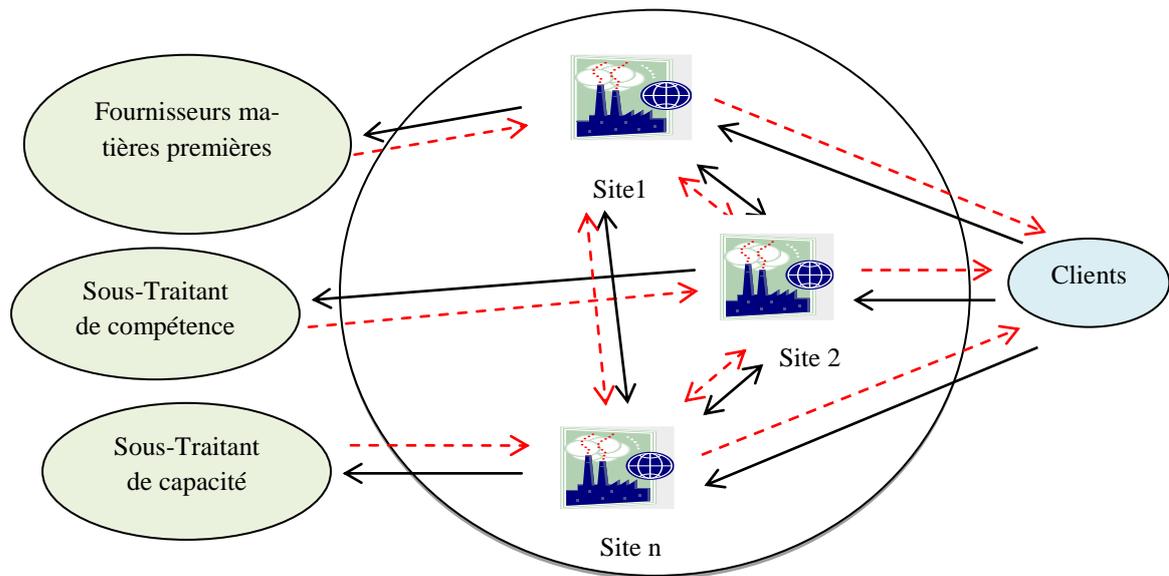


Figure I.13. Exemple d'une entreprise multi-site [Thierry, 1994]

Cette troisième forme est très émergente dans le monde industriel. Les entreprises multi-sites se trouvent dans plusieurs secteurs industriels tels que l'industrie automobile (Renault, Mercedes-Benz, etc.), l'industrie aérospatiale (Airbus, Dassault Aviation, etc.), l'industrie électronique et électrique (Schneider, Merlin Gerin, etc.). Dans un tel type d'entreprise, chaque site est considéré comme une entité autonome qui gère un certain nombre de ressources pour réaliser un ensemble d'activités de production qui relèvent de sa charge. Cette gestion de la production est souvent assurée par des outils informatisés propres au site considéré. La production globale de l'ensemble de l'entreprise s'effectue, ainsi, d'une manière distribuée en s'appuyant sur des mécanismes de coordination et de coopération entre les différents sites.

Cependant, une telle organisation constitue, selon plusieurs cas d'études, une source d'inefficacité [Bourrières *et al.*, 2005]. En fait, chaque système local assure le pilotage de sa

production avec une vision restreinte de l'ensemble des ressources et des objectifs qui lui sont propres, ce qui n'assure pas forcément l'optimisation globale de la production à l'échelle de l'entreprise multi-sites dans son ensemble. De plus, malgré l'effort consenti pour améliorer les méthodes permettant de rendre plus fiables les processus de coordination et de coopération entre les différents sites, chaque système local ne parvient pas vraiment à prendre en compte les ressources des autres sites lors de la conduite de son processus de fabrication. Il en résulte alors, une mauvaise utilisation des ressources de l'entreprise multi-sites. Une telle inefficacité peut être la cause de problèmes divers tels que le retard de livraison ou bien le manque de réactivité aux opportunités de marché, et peut affecter sérieusement la compétitivité et la performance de l'entreprise.

Le besoin d'appréhender la problématique de la gestion globale de la production dans un réseau d'entreprises et, plus particulièrement, dans un contexte d'entreprise multi-sites devient de plus en plus une exigence. Des travaux récents se sont intéressés à fournir des solutions à cette problématique : [Thierry, 1994], [Ozdamar et Barbarosoglu, 1999], [Camalot, 2000], [Bourrières *et al.*, 2005].

I.5.3. Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management – SCM)

Le *Supply Chain Management* (SCM), ou *gestion de la chaîne logistique intégrée* a fait l'objet de nombreuses définitions dans la littérature anglo-saxonne. [Stadtler et Kilger, 2005] définissent le SCM comme :

« La tâche d'intégrer les unités organisationnelles tout au long de la chaîne logistique et la coordination des flux physiques et d'informations dans le but de satisfaire la demande du client (final) en ayant pour but d'améliorer la compétitivité de la chaîne dans son ensemble ».

Des synthèses sur le SCM ont été publiées dans [Tayur *et al.*, 1999], [Tan, 2001] et [Croom *et al.*, 2001]. On relève ici plusieurs définitions [Mentzer *et al.*, 2001].

<p>[Jones et Riley, 1985]</p>	<p>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.</p>
<p>[Simchi-Levi <i>et al.</i>, 2003]</p>	<p>La gestion des chaînes logistiques est un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs, de manière à ce que la marchandise soit produite et distribuée à la bonne quantité, au bon endroit et au bon moment dans le but de minimiser les coûts et d'assurer le niveau de service requis par le client.</p>
<p>[Berry <i>et al.</i>, 1994]</p>	<p>La gestion de la chaîne logistique a pour but d'établir des relations de confiance, d'échanger des informations sur les besoins du marché, de développer des nouveaux produits et de réduire la base de fournisseurs d'une entreprise afin de libérer des ressources de gestion pour développer des relations significatives sur le long terme.</p>
<p>[Thomas et Griffin, 1996]</p>	<p>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.</p>
<p>[Tan <i>et al.</i>, 1998]</p>	<p>La gestion de la chaîne logistique englobe la gestion des approvisionnements et des marchandises depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au produit fini (et aussi de son éventuel recyclage). La gestion de la chaîne logistique se focalise sur la façon dont les entreprises utilisent les processus, la technologie et l'aptitude à améliorer la compétitivité de leurs fournisseurs. C'est une philosophie de management qui prolonge les activités classiques intra-entreprise, rassemblant l'ensemble des partenaires commerciaux avec un but commun d'optimisation et d'efficience.</p>
<p>[Geunes et Chang, 2001]</p>	<p>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.</p>

[Rota-Franz <i>et al.</i> , 2001]	Faire du “Supply Chain Management” signifie que l’on cherche à intégrer l’ensemble des moyens internes et externes pour répondre à la demande des clients. L’objectif est d’optimiser de manière simultanée, et non plus séquentielle, l’ensemble des processus logistiques.
[Dominguez et Lashkari, 2004]	L’intérêt du Supply Chain Management (SCM) est de faciliter les ventes en positionnant correctement les produits en bonne quantité, au bon endroit, et au moment où il y en a besoin et enfin à un coût le plus petit possible. Le principal objectif du SCM est d’allouer efficacement les ressources de production, distribution, transport et d’information, en présence d’objectifs conflictuels, dans le but d’atteindre le niveau de service demandé par les clients au plus bas prix.

Tableau I.1. Définitions de la gestion de la chaîne logistique

Les entreprises appartenant à une même chaîne logistique sont liées par des flux de produits, des flux d’informations et des flux financiers. Pour optimiser le fonctionnement de la chaîne logistique, les entreprises impliquées doivent se coordonner en tentant de satisfaire, d’une part, leurs objectifs locaux et, d’autre part, les objectifs globaux de la chaîne logistique. La gestion d’une chaîne logistique pose ainsi un problème de décision distribuée où les contextes et les objectifs propres aux différents acteurs de la chaîne diffèrent, malgré les intérêts communs partagés.

I.5.4. Offres en logiciels pour la gestion de la chaîne logistique (SCM)

Les exigences issues de la gestion efficace des chaînes logistiques et le besoin de réactivité ont rendu nécessaire l’adaptation des entreprises à de nouveaux modes de gestion de l’information. En particulier, les aspects humains sont de première importance pour que la collaboration se déroule dans de bonnes conditions. Néanmoins, l’implémentation d’outils support à la collaboration ne doit pas être négligée. Les technologies de l’information et de la communication (TIC) ont fortement influencé l’évolution des entreprises dans cette direction [Gunasekaran *et al.*, 2006].

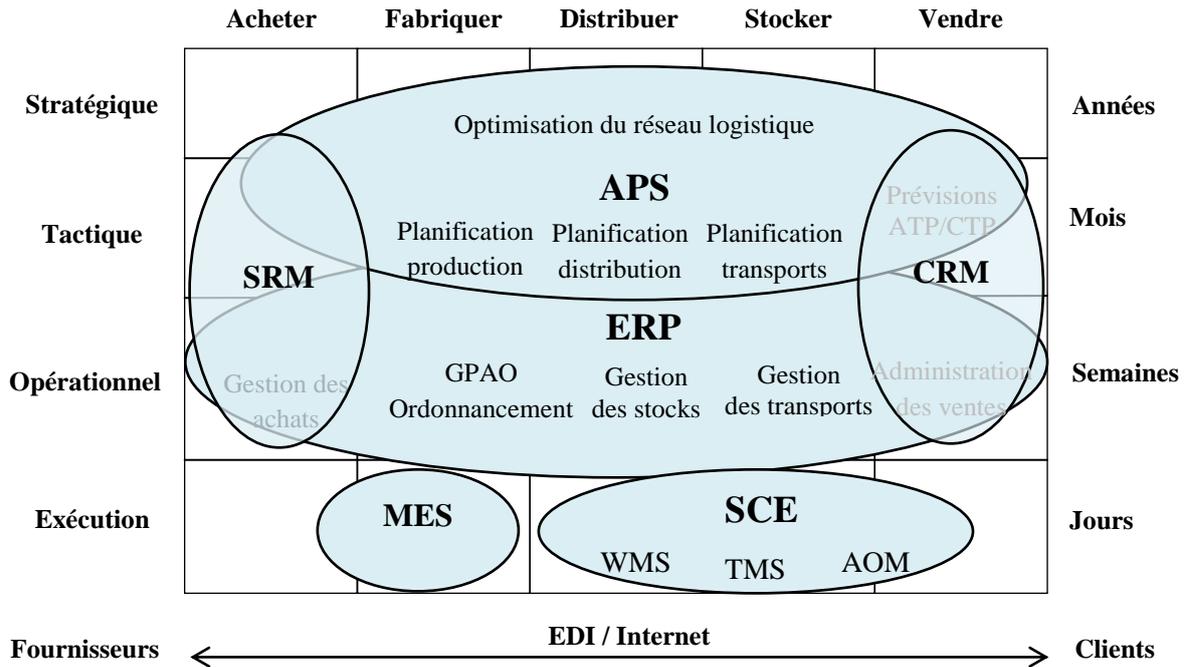


Figure I.14. Positionnement de l'offre logicielle en SCM [Botta-Genoulaz, 2003]

La figure I.14 présente un état des lieux sur les systèmes d'information et de communication utilisables par les entreprises, couvrant la majeure partie des besoins de l'entreprise sur les différents niveaux décisionnels. En effet, compte tenu du nombre de variables à traiter et de l'éclatement géographique des sites de production, les TIC sont au cœur de la gestion d'entreprise et de la chaîne logistique. On y trouve pour :

La gestion de la logistique industrielle : APS (*Advanced Planning and Scheduling*), ERP (*Entreprise Ressources Planning*), les logiciels de GPAO (*Gestion de Production Assistée par Ordinateur*), MES (*Manufacturing Execution System*), etc.

La gestion des entrepôts : Progiciels de gestion d'entrepôts (*WMS Warehouse Management System*) et les applications de gestion de stocks.

La communication et échange de données inter-entreprises : Bon de commande, Facturation, réception en magasin, ordre d'expédition, niveau de stocks, etc. Cela repose sur des réseaux et standard EDI (*Electronic Data Interchange*), les CRM (*Customer Relationship Management*) et les AOM (*Advanced Order Management*).

La gestion de flotte : Logiciels d'optimisation de chargements, de tournées, d'itinéraires et de gestion de parc (*TMS Transport Management System*), GPS (*Global Positioning System*) de localisation des véhicules.

La traçabilité des marchandises : Identification et localisation des produits, des lots de production, d'un contenant, etc. Elle met en œuvre des technologies d'identification (*code-barres, RFID Radio Frequency IDentification*) et de communication GPS.

Notre travail de thèse s'inscrit dans l'évolution des *ERP* vers les *APS*. En effet, l'*ERP* étant un système transactionnel, il demande désormais d'être complété par des systèmes décisionnels ou d'aide à la décision dans un but d'optimisation dépassant les frontières de l'entreprise [François, 2007]. En réponse, un *APS* permet l'optimisation du flux matière pour des sites de production distants [Stadtler et Kilger, 2005]. Il est défini comme étant « *une solution logicielle permettant de résoudre des problèmes de planification complexes en appliquant les techniques d'optimisation* » [Wolosewicz, 2008]. Les *APS* peuvent notamment prendre en compte la capacité finie des ressources lors de la planification, simuler plusieurs scénarios de planification et gérer plusieurs sites de production, ce qui est nécessaire dans le cas des entreprises multi-sites ou des réseaux d'entreprises.

I.6. Conclusion

La gestion des chaînes logistiques touche différents niveaux décisionnels. Notre travail de thèse s'intéresse à la planification tactique et opérationnelle d'une chaîne logistique. Dans ce chapitre, nous avons élaboré une revue des approches de planification / ordonnancement et nous avons posé la fonction planification dans ses dimensions horizontale et transversale. Pour la planification dynamique d'une chaîne logistique, nous proposons une approche décisionnelle à deux niveaux. Le modèle proposé intègre les décisions prises au niveau supérieur comme contraintes à respecter au niveau inférieur (niveau opérationnel) en vue de garantir la faisabilité du plan de production. Il sera modélisé sous forme d'un *Problème de Satisfaction de Contraintes (Constraint Satisfaction Problem, CSP)*. Ainsi, le chapitre suivant rappelle les notions de base des problèmes de satisfaction de contraintes, les mécanismes de résolution et les extensions dans un contexte dynamique.

CHAPITRE II.

LES PROBLEMES DE SATISFACTION DE CONTRAINTES

II.1. Introduction

Les problèmes de satisfaction de contraintes ou CSP (*Constraint Satisfaction Problems*) offrent un formalisme générique permettant la modélisation d'un grand nombre de problèmes d'optimisation combinatoire (planification, ordonnancement, conception, diagnostic, ...). Sur le plan de la résolution, l'approche par satisfaction de contraintes combine des méthodes de recherche opérationnelle (théorie des graphes, programmation mathématique, méthodes exactes et approchées, etc.), avec des techniques issues de l'intelligence artificielle (algorithmes de recherche arborescente, algorithmes de propagation de contraintes, langages de programmation par contraintes, etc.). Résoudre un CSP consiste à affecter des valeurs aux variables du problème telles que toutes les contraintes soient satisfaites. En général, la résolution consiste à trouver une solution admissible (problème de satisfaisabilité) ou une solution de meilleur coût (problème d'optimisation).

Les langages de programmation par contraintes donnent la possibilité de séparer nettement la modélisation et la résolution d'un CSP. Pour la modélisation, les langages permettent d'exprimer les contraintes de façon naturelle et déclarative, en faisant abstraction de l'exploitation qui en sera faite durant la résolution. Pour la résolution, les langages s'appuient sur des mécanismes (inférence sur les contraintes, filtrage des domaines) dédiés à chaque type de contraintes ; ils proposent également des stratégies de choix de variables et de choix de valeurs pour les variables, afin de guider efficacement la construction des solutions.

Dans un contexte dynamique, par exemple dans un problème réel d'ordonnancement d'atelier où l'exécution est rarement conforme à la prévision (pannes machines, commandes urgentes ou annulées, etc.), un modèle CSP nécessite une modification successive des données du problème. La présence de ces aléas implique la nécessité d'introduire un caractère dynamique dans le modèle CSP. La notion de CSP dynamique a ainsi été introduite par [Dechter et Dechter, 1988] pour représenter la situation suivante : un CSP dynamique est une séquence de CSP où chaque élément diffère du premier par l'*ajout* ou le *retrait* de certaines contraintes.

Pour la résolution des CSP dynamiques, la notion de *stabilité* des solutions successives devient importante. C'est le cas où le décideur, face à un aléa, désire repartir de la solution précédente pour fournir une nouvelle solution, en conservant si possible le maximum de décisions déjà prises, car la remise en cause d'une décision prend du temps et présente un coût

non négligeable. Nous aurons par la suite comme exigence de couvrir ce besoin de *stabilité*. Dans le cadre de cette thèse, le modèle développé s'inscrit dans l'approche de satisfaction de contraintes dynamiques.

La première partie de ce chapitre présente les notions de base d'un problème de satisfaction de contraintes. La deuxième se focalise sur la présentation des problèmes de satisfaction de contraintes dynamiques. La dernière partie est destinée à la présentation des méthodes de résolution pour un problème de satisfaction de contraintes dynamiques.

II.2. Le Problème de Satisfaction de contraintes (CSP)

II.2.1. Définitions et notions

Un problème de satisfaction de contraintes (CSP) est défini par la donnée d'un ensemble de variables, chacune associée à un domaine de valeurs, et d'un ensemble de contraintes qui mettent en relation les variables. De façon plus formelle [Montanari, 1974], [Mackworth, 1977], [Tsang, 1993], on définit un CSP par un triplet (X, D, C) tel que :

- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ est l'ensemble des variables du problème,
- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ est l'ensemble des domaines. A chaque variable $X_i \in X$, $1 \leq i \leq n$, est associé un domaine $D_i \in D$ qui représente l'ensemble des valeurs possibles pour X_i ,
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ est l'ensemble des contraintes où une contrainte C_i est définie sur un ensemble de variables $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ appelé $Var(C_i)$.

Étant donné un CSP (X, D, C) , la résolution consiste à affecter des valeurs aux variables de telle sorte que toutes les contraintes soient simultanément satisfaites.

i. Domaines de calcul

On parle de CSP discrets lorsque les variables de décision sont discrètes et les domaines finis et de CSP continus lorsque les domaines sont continus et les variables réelles.

ii. Contrainte

Une contrainte est une relation entre différentes variables. Cette variable peut être définie en extension ou en intension :

- Pour définir une contrainte *en extension*, on énumère les n-uplets de valeurs appartenant à la relation. Par exemple, si les domaines des variables X_1 et X_2 contiennent les valeurs 0, 1 et 2, alors on peut définir la contrainte « $X_1 < X_2$ » en extension par « $(X_1 = 0 \text{ et } X_2 = 1)$ ou $(X_1 = 0 \text{ et } X_2 = 2)$ ou $(X_1 = 1 \text{ et } X_2 = 2)$ », ou encore par « $(X_1, X_2) \in \{(0,1), (0,2), (1,2)\}$ »,

- Pour définir une contrainte *en intension*, on utilise des propriétés mathématiques connues. Par exemple: « $X_1 + X_2 = 3$ » ou encore « $X_1 + X_2 < 2$ ».

L'arité d'une contrainte est le nombre de variables sur lesquelles elle porte. On dira que la contrainte est :

- *unaire* si son arité est égale à 1, par exemple « $X_1 * X_1 = 4$ »,
- *binnaire* si son arité est égale à 2, par exemple « $X_1 \neq X_2$ »,
- *ternaire* si son arité est égale à 3, par exemple « $X_1 + X_2 < 3 * X_3 - 4$ »,
- *n-aire* si son arité est égale à n (elle met en relation un ensemble de n variables).

On distingue différents types de contraintes en fonction des domaines de valeurs des variables du problème :

- Les contraintes numériques, portant sur des variables à valeurs numériques : une contrainte numérique est une égalité ($=$), une différence (\neq) ou une inégalité ($<$, \leq , $>$, \geq) entre deux expressions arithmétiques. Sous ce type de contraintes, nous retrouvons :
 - *Les contraintes numériques sur les réels*, quand les variables de la contrainte peuvent prendre des valeurs réelles, par exemple une contrainte physique comme « $U = R * I$ »,
 - *Les contraintes numériques sur les entiers*, quand les variables de la contrainte ne peuvent prendre que des valeurs entières, par exemple une contrainte sur le nombre de personnes pouvant embarquer dans un avion,
 - *Les contraintes numériques non linéaires*, quand les expressions arithmétiques contiennent des produits de variables, ou des fonctions logarithmiques, exponentielles, etc. Par exemple, « $X_1 * X_1 = 2$ » ou « $\sin(X_1) + X_3 * \log(X_2) = 4$ »,
 - *Les contraintes booléennes*, portant sur des variables à valeur booléenne (vrai ou faux). Une contrainte booléenne est une implication (\Rightarrow), une équivalence (\Leftrightarrow) ou une non équivalence (\nLeftrightarrow) entre 2 expressions logiques. Par exemple « $(\text{non } a) \text{ ou } b \Rightarrow c$ » ou encore « $\text{non } (a \text{ ou } b) \Leftrightarrow (c \text{ et } d)$ ».

Enfin, nous signalons que les extensions apportées au modèle CSP de base ont donné lieu à bien d'autres types de CSP que nous détaillerons dans la suite.

iii. Vocabulaire utile

L'approche CSP fait appel à un certain nombre de termes spécifiques. Pour une meilleure compréhension, nous rappelons les notions suivantes :

- On appelle *affectation* le fait d'instancier certaines variables par des valeurs. On notera $A = \{(X_1, V_1), (X_2, V_2), \dots, (X_r, V_r)\}$ l'affectation qui instancie la variable X_1 par la valeur V_1 , la variable X_2 par la valeur V_2, \dots , et la variable X_r par la valeur V_r .
- Une affectation est dite *totale* si elle instancie toutes les variables du problème ; elle est dite *partielle* si elle n'en instancie qu'une partie.
- Une affectation A viole une contrainte C_j si toutes les variables de C_j sont instanciées dans A , et si la relation définie par C_j n'est pas vérifiée pour les valeurs des variables de C_j définies dans A .
- Une affectation (totale ou partielle) est *consistante* si elle ne viole aucune contrainte, et *inconsistante* si elle viole une ou plusieurs contraintes.
- Une *solution* est une affectation totale consistante, c'est-à-dire une valuation de toutes les variables du problème qui ne viole aucune contrainte.

iv. Exemple CSP

Considérons un problème d'ordonnancement comportant quatre activités (1, 2, 3 et 4) ayant chacune une date de début S_i , une date de début au plus tôt ES_i et au plus tard LS_i et une durée P_i (tableau II.1).

Activité	ES_i	LS_i	P_i
1	0	7	3
2	2	6	2
3	1	10	4
4	4	13	1

Tableau II.1. Données du problème

Ces activités sont liées par les contraintes de précédence (notée de façon symbolique " \rightarrow " ci-après) : $1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 4$ et $3 \rightarrow 4$.

Notons que sur le plan numérique la contrainte de précédence $i \rightarrow j$ peut s'exprimer par la contrainte $S_i + P_i \leq S_j$. Ainsi, ce problème peut être modélisé comme un CSP (X, D, C) où :

$$X = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$$

$$D = \{D_1 = [0, 7], D_2 = [2, 6], D_3 = [1, 10], D_4 = [4, 13]\}$$

$$C = \{C_1: S_1 + 3 \leq S_2, C_2: S_1 + 3 \leq S_3, C_3: S_2 + 2 \leq S_4, C_4: S_3 + 4 \leq S_4\}$$

II.2.2. Techniques de propagation de contraintes

Une solution d'un CSP est un ensemble d'instanciations des variables qui satisfait toutes les contraintes. Prouver qu'un CSP a une solution ou trouver une (ou toutes) les solutions d'un CSP reste un problème NP-complet dans le cas général. Pour pallier cette complexité de résolution, des mécanismes de propagation de contraintes peuvent être utilisés. Un grand nombre de ces méthodes ont donc été développées pour tenter de réduire le coût de résolution d'un CSP. Nous nous intéressons dans ce travail aux méthodes employées pour les CSP sur les domaines finis. Parmi ces méthodes, les plus populaires sont les techniques de renforcement de consistance qui visent à réduire l'espace de recherche avant et pendant la résolution.

Les techniques de renforcement de consistance ont pour objet de filtrer les domaines. Ces techniques tentent d'éliminer des valeurs dans les domaines des variables pour lesquelles certaines contraintes ne peuvent être satisfaites (valeurs inconsistantes). Cela permet de réduire la taille des domaines et donc de limiter la taille de l'arbre de recherche en éliminant les branches qui portent ces valeurs inconsistantes. Le CSP résultant de ce filtrage est inclus dans le CSP initial, c'est-à-dire que son espace de recherche a été réduit tout en conservant l'ensemble des solutions.

La consistance d'arc ou arc-consistance (*Arc-Consistency* ou AC) est définie pour les CSP binaires (chaque contrainte porte sur deux variables). Cette notion d'arc-consistance peut être étendue à k variables. On obtient alors la k -consistance. Lorsqu'on se limite à représenter les domaines des variables uniquement par leurs bornes inférieure et supérieure (soit un

intervalle) plutôt que par l'énumération des valeurs contenues dans le domaine, la propagation de contraintes se réduit à une consistance aux bornes (*Bound-Consistency*).

- Arc-consistance : Soit X_i une variable et V_i une valeur de son domaine D_{X_i} . On dit que le couple (X_i, V_i) vérifie l'arc-consistance si et seulement si pour chaque contrainte C telle que $V_i \in \text{var}(C)$, il est possible de trouver une instanciation réalisable des variables de la contrainte C pour laquelle la valeur V_i est affectée à la variable X_i .

Un domaine D_{X_i} vérifie l'arc-consistance si et seulement s'il est non vide et toutes ses valeurs vérifient l'arc-consistance. Un CSP vérifie l'arc-consistance si tous ces domaines vérifient l'arc-consistance. Le filtrage par arc-consistance consiste alors à éliminer les valeurs de variables qui ne peuvent pas localement (en se contentant d'observer la situation uniquement du point de vue de la contrainte traitée) figurer dans une solution.

- k -consistance: Soit $S = \{X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_{k-1}}\}$ un ensemble de $k-1$ variables. Une instanciation I_S consiste à affecter à chaque variable X_{i_j} de S une valeur V_{i_j} de son domaine:

$$I_S = \{(X_{i_1}, V_{i_1}), (X_{i_2}, V_{i_2}), \dots, (X_{i_{k-1}}, V_{i_{k-1}})\}$$

On dit que $I_S = \{(X_{i_1}, V_{i_1}), (X_{i_2}, V_{i_2}), \dots, (X_{i_{k-1}}, V_{i_{k-1}})\}$ vérifie la k -consistance si et seulement si pour toute variable supplémentaire $X_{i_k} \notin S$, il existe au moins une valeur $V_{i_k} \in D_{V_{i_k}}$ telle que l'instanciation $\{(X_{i_1}, V_{i_1}), (X_{i_2}, V_{i_2}), (X_{i_{k-1}}, V_{i_{k-1}}), \dots, (X_{i_k}, V_{i_k})\}$ soit localement consistante. Un sous-ensemble $S = \{X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_{k-1}}\}$ vérifie la k -consistance si et seulement si toute instanciation de ses $k-1$ variables vérifie la k -consistance. Un CSP est k -consistant si et seulement si tout sous-ensemble de X de cardinal $k-1$ est k -consistant.

- Consistance aux bornes : Une contrainte C vérifie la consistance aux bornes si et seulement si pour chaque variable $X_i \in \text{var}(C)$ de domaine $D_{X_i} = [a_i, b_i]$, il existe au moins une valeur dans le domaine des autres variables de $\text{var}(C)$ qui satisfait C lorsque V_i est instanciée à a_i et lorsque V_i est instanciée à b_i .

Un CSP vérifie la consistance aux bornes si et seulement si toutes ses contraintes vérifient la consistance aux bornes.

Exemple : Reprenons les données du [tableau II.1](#). Soit la contrainte $C_1: S_1 + 3 \leq S_2$. C_1 n'est pas consistante aux bornes car en affectant à la variable S_1 , de domaine $D_1 = [0, 7]$, la valeur $V_1 = 7$, il n'existe pas dans le domaine de la variable S_2 de domaine $D_2 = [2, 6]$ une valeur qui satisfasse la contrainte C_1 . La valeur $V_1 = 7$ doit donc être éliminée du domaine D_1 .

II.2.3. Méthodes de résolution d'un CSP

La résolution d'un CSP s'appuie sur des techniques de propagation de contraintes (le plus souvent un filtrage par arc-consistance et / ou par consistance aux bornes), une stratégie de recherche arborescente (phase de recherche de solutions) incluant un retour arrière en cas d'échec, et une heuristique d'instanciation (ordre sur les variables et ordre sur les valeurs). Chaque phase est réalisée au moyen d'algorithmes dédiés.

- Phase de propagation de contraintes

Le filtrage consiste à éliminer les valeurs des variables qui ne peuvent appartenir à aucune solution. Ceci permet d'éviter des calculs inutiles et permet de mener à une résolution plus rapidement. Lorsqu'un domaine de valeurs devient vide, on parvient à une incohérence et le problème n'admet par conséquent pas de solution. Le filtrage consiste donc au fur et à mesure de l'affectation des variables à s'assurer qu'il ne reste dans les domaines des variables non encore affectées que des valeurs ayant au moins un support pour les contraintes auxquelles elles sont associées. Plusieurs algorithmes de cohérence d'arc (AC) ont été proposés. En 1977, Macworth proposa AC-1 et surtout AC-3 [Macworth, 1977]. Depuis, plusieurs améliorations ont suivi et d'autres algorithmes ont été proposés tels que : AC-4 [Mohr et Henderson, 1986], AC-6, AC-7 et AC-2001 [Bessière et Régis, 2001], [Zhang et Yap, 2001], [Bessière *et al.*, 2005].

La figure suivante ([Figure II.1](#)) montre la réduction des domaines des variables pendant la phase de propagation de contraintes. On présente un CSP à 4 variables $\{x, y, z, w\}$ tel que $D_x = D_y = D_z = D_w = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, auxquelles on impose 3 contraintes $\{C_1, C_2, C_3\}$. Par exemple, initialement, $D_x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ et après propagation de la contrainte C_1 , D_x est réduit à deux valeurs : $D_x = \{1, 2\}$. Le retrait des valeurs inconsistantes dans le domaine D_x déclenche à son tour le filtrage d'autres domaines, par le biais des autres contraintes. Ceci est réitéré tant qu'on peut prouver l'existence de valeurs inconsistantes, jusqu'à stabilisation

complète des domaines, qui deviennent alors minimaux. Ce processus s'apparente au mécanisme de déduction logique en chaînage avant par saturation (recherche de l'ensemble complet des déductions) les déductions consistant ici à éliminer les valeurs inconsistantes.

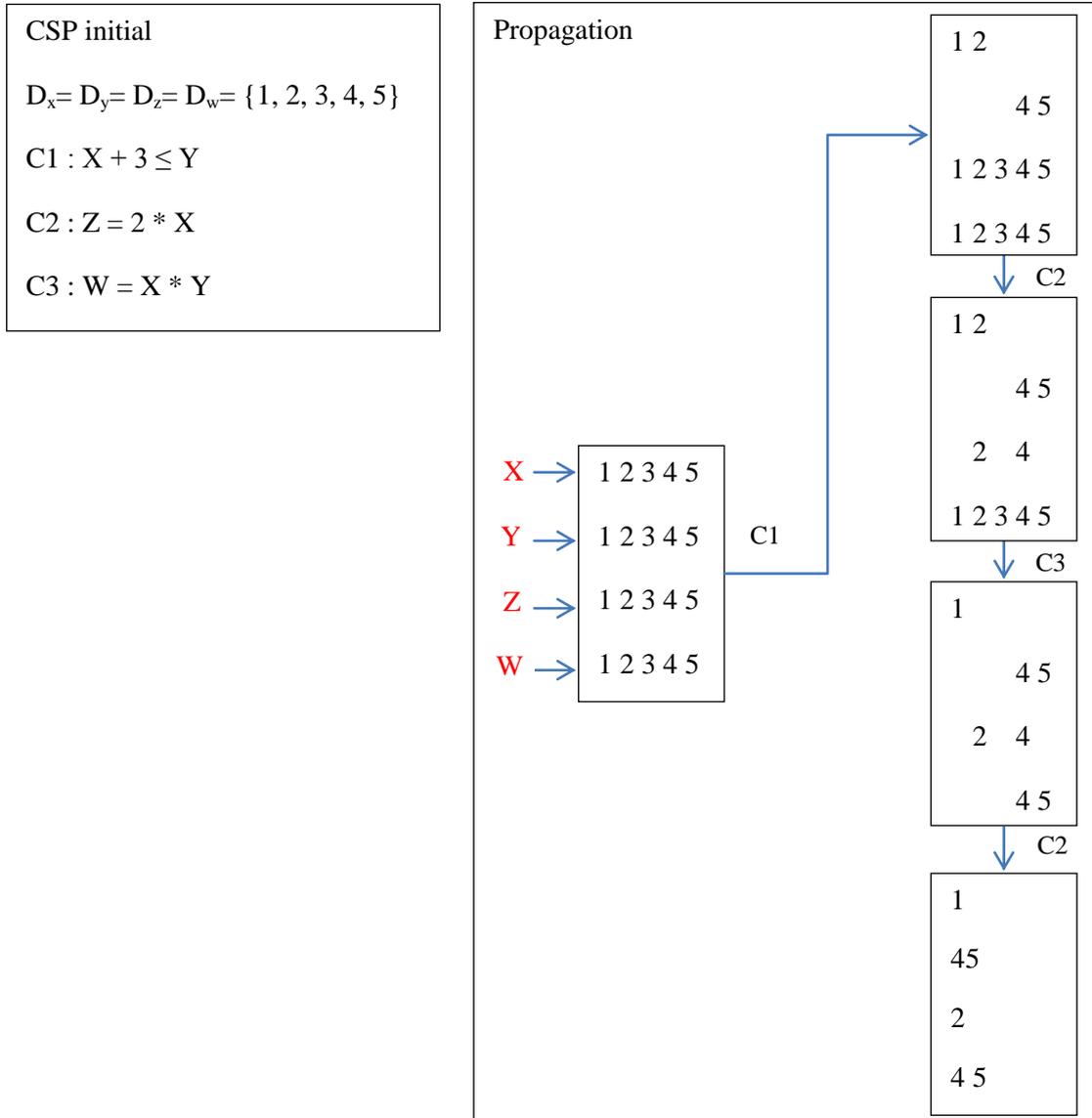


Figure II.1. Phase de propagation de contraintes [Lopez, 2001]

- Phase de recherche de solutions

Elle consiste à élaborer des combinaisons de valeurs compatibles entre elles au regard de toutes les contraintes. Pour cela, les combinaisons sont construites progressivement, variable par variable, chaque étape étant caractérisée par une solution partielle. La génération cesse dès qu'une variable encore libre voit son domaine devenir vide (inconsistance) ; il faut alors être capable de remettre en cause un ou plusieurs choix précédents. Plusieurs algorithmes de

recherche arborescente existent. On distingue par exemple : des méthodes de parcours complet comme *Chronological Backtracking* (CB) [Bitner et Reingold, 1975], *Limited Discrepancy Search* (LDS) [Harvey et Ginsberg, 1995], et des méthodes incomplètes mais parfois plus efficaces comme *Randomization and Restart* [Gomes *et al.*, 1998]. Certaines de ces méthodes sont des algorithmes hybrides, en ce sens qu'elles intègrent un certain niveau de filtrage avant chaque instanciation de variable dans le développement de l'arbre (*Real-Full-Look-Ahead*, *Forward-Checking* [Harvey et Elliot, 1980], [Nadel, 1989], *Maintaining Arc-Consistency* (MAC) [Sabin et Freuder, 1994]).

Le *Chronological Backtracking* ou retour arrière chronologique est une méthode de résolution issue de l'intelligence artificielle pour la résolution des CSP. Son algorithme considère les variables l'une après l'autre. Pour chaque variable, on cherche une valeur qui soit compatible avec toutes les valeurs données aux variables instanciées précédemment. Si une telle valeur existe, alors on passe à la variable suivante. Sinon, on revient sur la dernière variable instanciée pour essayer une autre valeur, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on trouve une solution ou que l'on explore tout l'espace de recherche.

Une autre méthode de recherche de solutions basée sur un parcours particulier de l'arbre de recherche est *Limited Discrepancy Search* [Harvey et Ginsberg, 1995] ou recherche à divergences limitées.

A partir d'une heuristique d'instanciation donnant un ordre sur les variables et un ordre sur les valeurs des variables, une instanciation complète initiale est générée. Si cette « solution » s'avère en fait non admissible (ne respectant pas les contraintes du problème), on autorise la méthode à ne pas suivre les choix de l'heuristique d'instanciation pour certaines variables. Le fait de s'écarter des choix guidés par l'heuristique correspond à la notion de divergence.

Les algorithmes utilisant la propagation de contraintes tentent d'éviter qu'une incohérence soit détectée tardivement, après qu'une grande partie de l'arbre de recherche a été explorée. En effet, ils n'acceptent une valeur V qu'après avoir vérifié que les domaines des variables futures ne deviennent pas vides ([figure II.2](#)).

L'algorithme forward-checking : Il applique une forme de consistance locale aux variables non encore instanciées. Les variables futures à instancier voient leur domaine de valeurs réduit par filtrage (par arc-consistance par exemple), ce qui par la suite permettra de limiter la recherche. Cependant, les seules variables futures qui sont soumises au filtrage sont limitées aux seules variables libres qui sont liées à la variable courante par au moins une contrainte : le filtrage n'est pas étendu aux autres variables.

L'algorithme real-full-look-ahead : Il propose la même philosophie de filtrage que le *forward-checking*, mais préconise aussi le filtrage de toutes les variables futures à instancier. Le filtrage est donc beaucoup plus profond au cours de la recherche, ce qui se paie en général par un coût algorithmique plus élevé.

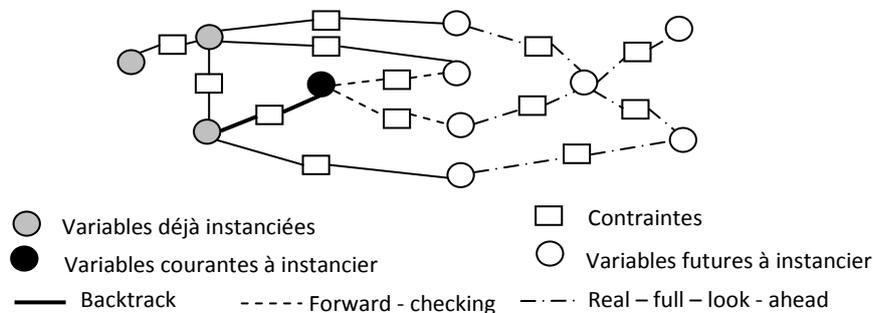


Figure II.2. Les algorithmes de recherche CSP [Fischer, 2000]

- Heuristiques d'instanciation

Les heuristiques d'ordre sont des règles qui déterminent l'ordre suivant lequel on va choisir les variables à instancier, et pour chacune l'ordre dans lequel on essaie les valeurs de son domaine courant. On distingue donc les heuristiques d'ordre sur les variables et les heuristiques d'ordre sur les valeurs. Un bon ordre permet de détecter les échecs le plus tôt possible et par la suite d'éviter l'exploration d'une grande partie de l'arbre de recherche en vain. A titre d'exemple on peut citer *l'heuristique du domaine minimal* qui préconise de choisir en premier la variable qui a le plus petit domaine courant ; concernant l'ordre sur les valeurs, on peut citer *l'heuristique de l'échec au plus tôt (first-fail)* qui consiste à attribuer à la variable choisie la valeur qui est susceptible de mener le plus tôt possible à un échec.

II.2.4. CSP et optimisation

Résoudre un CSP peut consister à trouver une solution (satisfaisabilité), ou trouver une de meilleur coût (optimisation). Dans ce dernier cas, on parle plutôt de CSOP (*Constraint Satisfaction and Optimization Problem*).

Un CSOP est défini par un quadruplet (X, D, C, Z) , où X est un ensemble fini de variables, D est l'ensemble des domaines associés à ces variables, C est l'ensemble des contraintes qui portent sur ces variables et Z (le critère à optimiser) est une fonction de l'instanciation totale des variables du problème, qui prend ses valeurs dans un ensemble ordonné : ce critère permet ainsi de comparer deux solutions pour choisir celle qui est la meilleure.

Toutes les méthodes exposées plus haut pour la recherche d'une solution d'un CSP s'appliquent également à la résolution des CSOP. Il s'agit de rechercher une solution satisfaisant toutes les contraintes du problème et qui, de plus, minimise ou maximise un critère donné. La résolution d'un CSOP peut être abordée de la manière suivante : Soit Z^* la valeur minimale de Z sur l'ensemble des solutions du problème. L'approche la plus intuitive consiste à résoudre une succession de problèmes de décision P . Le problème de décision P est initialisé avec les contraintes du problème, sans tenir compte du critère d'optimisation, puis résolu. Si P est inconsistant, alors le problème d'optimisation n'a pas de solution ; sinon, soit $\varphi^0(X)$ une première instanciation de X qui est solution de P ; la meilleure solution $\varphi^*(X)$ est initialement $\varphi^*(X) \leftarrow \varphi^0(X)$. Tant qu'on n'a pas exploré tout l'arbre de recherche des solutions, on tente de repartir du dernier point de choix non encore exploré pour trouver une nouvelle solution $\varphi^k(X)$ en ajoutant la nouvelle contrainte $Z(\varphi^k(X)) < Z(\varphi^*(X))$ préalablement à toute nouvelle décision en ce point ; si on peut trouver cette nouvelle solution on actualise $\varphi^*(X) \leftarrow \varphi^k(X)$ et on passe à l'étape suivante $k+1$; sinon, si aucun point de choix restant ne respecte la contrainte d'amélioration du critère, la recherche s'arrête.

La dernière solution trouvée est donc prouvée solution optimale du problème. L'efficacité de cette méthode tient bien sûr pour beaucoup à l'efficacité du filtrage qu'engendre la propagation de la contrainte $Z(\varphi^k(X)) < Z(\varphi^*(X))$ avant chaque élaboration d'une nouvelle solution.

Si ce filtrage est fort, la réduction de l'arbre de recherche peut être drastique ; sinon, si la contrainte d'amélioration du coût n'est pas très active sur le filtrage, la recherche complète se

heurte à une combinatoire trop élevée et doit être interrompue après un temps limite donné. Dans ce cas, l'optimalité n'est plus prouvée même si on peut démontrer expérimentalement que sur un grand nombre de cas la méthode retourne de très bonnes solutions voire des solutions optimales (en comparant le coût des solutions trouvées à celui de solutions optimales générées par d'autres méthodes exactes).

II.3. Problèmes de satisfaction de contraintes dynamiques (DCSP)

En dépit des avantages qu'il offre sur le plan de l'expressivité et de la modélisation des contraintes, le modèle CSP rencontre néanmoins des limites face à certains problèmes réels dans lesquels les données du problème sont soumises à des perturbations provenant de l'environnement ou d'autres agents. « *C'est un modèle statique : le problème est défini dès le début du processus de la résolution et reste invariant tout au long de son déroulement : les variables, leurs domaines, les contraintes les liant sont connus à l'avance* » [Elkhiary, 2003]. Ainsi, une modification du problème impliquant un ajout ou un retrait de contraintes, de variables ou un changement du domaine de valeurs d'une variable ne peut pas être traitée par un modèle de satisfaction de contraintes statique.

Dans cette configuration, l'aspect dynamique d'un problème peut être formalisé de différentes façons. En effet, un DCSP (*Dynamic Constraint Satisfaction Problem*) permet d'adapter un CSP aux différentes perturbations qui peuvent survenir [Dechter et Dechter, 1988]. En revanche, d'autres formalismes tels que les CCSP (*Conditional CSP*) ([Mittal et Falkenhainer, 1990], [Sabin et Freuder, 1994]), les TCSP (*Temporal CSP*) [Schwalb et Dechter, 1991], les OCSP (*Open CSP*) [Faltings et Macho-Gonzalez, 2005], ... permettent de prendre en compte des évolutions déjà intégrées au modèle. La partie suivante est dédiée à la présentation de ces formalismes liés aux problèmes dynamiques [Verfaillie et Jussien, 2005].

II.3.1. Définitions DCSP

- **Définition 1**

Un problème de satisfaction de contraintes dynamique (*Dynamic Constraint Satisfaction Problem* ou DCSP) est une suite P_0, P_1, \dots de CSP classiques, tels que deux problèmes successifs P_i et P_{i+1} ne diffèrent que par l'ajout ou le retrait de certaines contraintes.

- **Définition 2**

Un DCSP P est une séquence P_0, \dots, P_n de CSP statiques telle que :

$$P_{i+1} = \mu(P_i) \text{ où } \mu : CSP \rightarrow CSP$$

[Richaud, 2009] indique que « résoudre un DCSP revient à trouver une solution au CSP le plus récent (le dernier de la séquence). Du fait du caractère incrémental de la séquence, les solutions des autres CSP de la séquence peuvent être des solutions intermédiaires intéressantes. Ainsi l'efficacité des DCSP reposent sur l'utilisation de méthodes permettant d'exploiter efficacement le travail effectué aux étapes antérieures ».

Pour savoir comment réutiliser le travail déjà fait nous nous intéressons dans la partie suivante aux transformations possibles pour passer d'un CSP P_i à un CSP $P_{i+1} = \mu(P_i)$. En effet, Si le CSP P_{i+1} est obtenu à partir du CSP P_i après le retrait d'une ou plusieurs contraintes, alors nous dirons que P_{i+1} est une relaxation de P_i . De même, si nous passons du CSP P_i au CSP P_{i+1} en ajoutant une ou plusieurs contraintes, alors nous dirons que P_{i+1} est une restriction de P_i . Aussi, les domaines peuvent être vus comme des contraintes unaires ; retirer ou ajouter une variable revient à modifier toutes les contraintes dans lesquelles la variable apparaît ([Dechter et Dechter, 1988], [Vareilles, 2005], [Verfaillie et Schiex, 1995], [Richaud, 2009]). Le tableau suivant présente l'ensemble des modifications possibles d'un CSP tel que $P' = \mu(P)$ avec $P = (X, D, C)$ et $P' = (X', D', C')$, sur l'ensemble des solutions.

Transformation de P à P'	C'
Ajout d'une contrainte c	Restriction
Retrait d'une contrainte c	Relaxation
Ajout d'une valeur val	Relaxation
Retrait d'une valeur val	Restriction
Ajout d'une variable var	Relaxation
Retrait d'une variable var	?

Tableau II.2. Effets des transformations élémentaires [Richaud, 2009]

II.3.2. DCSP et autres formalismes

Comme nous l'avons indiqué précédemment et contrairement aux DCSP, d'autres formalismes liés aux problèmes dynamiques permettent de prendre en compte des évolutions déjà intégrées au modèle. [Richaud, 2009] indique que « *il faut différencier le formalisme des DCSP de celui des CSP qui modélisent un problème dynamique* ». Il précise en outre que « *le but du DCSP est d'adapter un CSP aux perturbations extérieures venant modifier le problème et non pas de prendre en compte des évolutions déjà intégrées au modèle* ».

Par exemple, les OSCP (*Open CSP*) sont des CSP qui intègrent des variables dont les domaines ne sont pas initialement connus. Dans ce sens, un OSCP peut être vu comme un DCSP dont toutes les modifications se traduisent par une extension des domaines et des contraintes [Faltings et Macho-Gonzalez, 2005]. De même, pour un CCSP (*Conditional CSP*), les modifications possibles sont intégrées au modèle. Aussi, un CCSP peut être considéré comme une restriction d'un DCSP dans lequel toutes les modifications possibles sont définies par les contraintes d'activation. D'autres formalismes CSP existent dans la littérature. Nous pouvons citer les MCSP (*Mixed Constraint Satisfaction Problem*) [Fargier et al., 1996], les SCSP (*Stochastic Constraint Satisfaction Problem*) [Walsh, 2002] et les BCSP (*Branching Constraint Satisfaction Problem*) [Fowler et Brown, 2000b], [Fowler et Brown, 2000a]. [Richaud, 2009] présente une description détaillée des différents formalismes existant dans la littérature. Les CSP conditionnels (CCSP) sont plus particulièrement présentés dans la suite de ce document.

II.3.3. CSP conditionnels

Les CSP conditionnels [Mittal et Falkenhainer, 1990] sont définis comme un triplet (V, D, C) où :

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$ est un ensemble fini de variables composé de deux sous-ensembles disjoints :
 - Un ensemble V_a non vide de variables initialement actives,
 - Un ensemble V_i de variables initialement inactives ;
- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$ est un ensemble fini de domaines de définition des variables de V ;
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$ est un ensemble fini de contraintes de deux natures possibles :
 - un ensemble $C_C = \{C_1^c, C_2^c, \dots, C_n^c\}$ de contraintes de compatibilité,
 - un ensemble $C_A = \{C_1^a, C_2^a, \dots, C_n^a\}$ de contraintes d'activation.

Les contraintes d'activation permettent d'ajuster un modèle de connaissances à un problème particulier par la prise en compte exclusive des éléments indispensables à sa résolution. Elles modifient la structure du modèle par l'ajout et le retrait d'éléments (variables et contraintes) suivant les différentes situations du problème. Les contraintes d'activation se définissent en deux parties : une prémisse (condition logique) et un conséquent (ajout ou retrait d'un ensemble d'éléments) liées par un opérateur d'implication \rightarrow . Lorsque la prémisse est vérifiée, il y a application du conséquent : la structure du modèle est enrichie ou appauvrie en variables et contraintes. Sinon, sa structure reste inchangée [Vareilles, 2005]. Ces contraintes sont composées d'une prémisse $P(V_p)$ et d'un conséquent V_c . L'ensemble des variables V_p de la prémisse et l'ensemble des variables V_c du conséquent doivent être disjoints.

Les contraintes d'activation de variables sont de la forme :

$$P(V_p) \rightarrow (\text{dés})\text{activation} : V_c$$

Chaque variable possède un état actif ou inactif qui indique si celle-ci doit être ou non prise en compte dans le problème courant. Les contraintes de compatibilité prennent part au filtrage lorsque toutes les variables sur lesquelles elles portent sont actives. Sinon, elles sont considérées comme trivialement satisfaites. Une solution d'un CSP conditionnel correspond à un ensemble de variables valuées, contenant obligatoirement l'ensemble V_a des variables initialement actives, respectant toutes les contraintes de compatibilité C_c du modèle.

II.4. Résolution d'un CSP dynamique

Comme défini précédemment, un DCSP est une séquence de CSP statiques pour laquelle on souhaite trouver une solution. Pour trouver une solution on pourrait se concentrer sur chaque CSP et tenter de les résoudre indépendamment les uns des autres à l'aide des méthodes de résolution classiques. Ce serait passer à côté de la spécificité des DCSP : le caractère incrémental de la séquence de CSP. De plus il ne faut pas oublier qu'un DCSP s'inscrit dans le temps : souvent lorsque les perturbations surviennent, une partie de la solution a déjà été réalisé. On ne peut donc pas résoudre en dehors de son contexte. En pratique, on se limite généralement au CSP précédent. Il existe plusieurs façons d'exploiter les informations de la recherche précédente.

D'un point de vue global, deux approches distinctes apparaissent dans la littérature pour la résolution des DCSP. Les approches basées sur la mémorisation et la réutilisation des solutions (utiliser l'information qui est consistante), et celles basées sur la mémorisation et la réutilisation des raisonnements (utiliser l'information qui est inconsistante) ([Elkhiary, 2003], [Verfaillie et Schiex, 1994], [Trombettoni, 1993], [Richaud, 2009]). Dans le paragraphe suivant, nous présentons dans le détail ces différentes méthodes de résolution relatives aux CSP dynamiques.

II.4.1. Approche par réutilisation de solution

Cette approche consiste à mémoriser et à réutiliser des solutions de problèmes précédents. Si un problème P_i a été résolu et prouvé consistant, une solution S_i de P_i a été trouvée et enregistrée, une modification est survenue dans la définition du problème P_i créant le problème P_{i+1} , alors S_i est aussi une solution de P_{i+1} si P_{i+1} est une relaxation de P_i , sinon (P_{i+1} est une restriction de P_i) S_i peut ne plus être une solution.

L'approche de réutilisation de solution repose sur l'idée suivante : si S_i est une solution du problème P_i , alors une solution du problème P_{i+1} (qui est proche de P_i) serait proche de S_i . Cette approche regroupe plusieurs méthodes parmi lesquelles, nous pouvons citer *la recherche arborescente*, *la recherche locale* et *la méthode par relaxation-affectation de variables*. Ces méthodes sont présentées ci-dessous.

i. La recherche arborescente

Cette méthode consiste à affecter en premier à chaque variable sa valeur dans la solution précédente : utiliser la solution du problème précédent comme heuristique de choix de la valeur dans le cadre de la recherche courante [Hentenryck et Provost, 1991]. Cette méthode a montré son efficacité et sa stabilité sur des problèmes soumis à des changements peu importants [Schiex et Fargier, 1995].

ii. La recherche locale

Cette méthode a été proposée sous le nom de *heuristic repair* dans [Minton et Johnston, 1992]. Toutes les méthodes appartenant à l'approche de réutilisation de solution utilisent la solution précédente comme point de départ de la recherche. De ce fait, à chaque étape, la recherche locale va réparer l'instanciation courante pour la rendre consistante et explorer son

voisinage [Richaud, 2009]. Cette méthode consiste alors à choisir une variable v d'une contrainte insatisfaite par l'affectation courante, lui affecter une valeur val choisie parmi les valeurs non explorées et à fixer v (une variable fixée étant une variable dont l'affectation ne peut être modifiée que par backtrack [Verfaillie et Schiex, 1995]). A chaque variable choisie est affectée une valeur val non explorée, celle minimisant le nombre de contraintes en conflit [Minton et Johnston, 1992].

Pour bien illustrer cette approche, nous présentons l'exemple de la [figure II.3](#) [Verfaillie et Jussien, 2005]. Nous nous basons sur un DCSP de quatre variables x , y , z et t de domaines respectifs $\{2\}$, $\{1,2,3\}$, $\{1,2,3\}$ et $\{3,4\}$ reliées par les contraintes suivantes : $x < y$, $y \leq z$ et $z \neq t$.

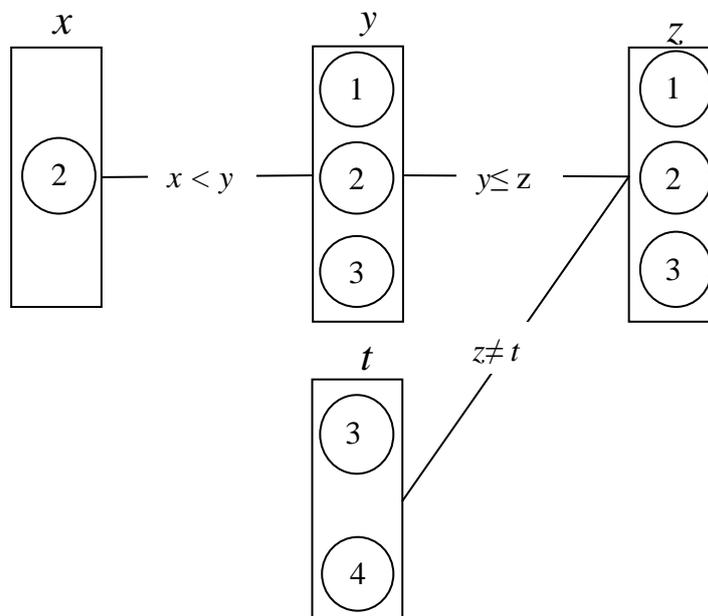


Figure II.3. Description du problème [Verfaillie et Jussien, 2005]

Initialement (étape $E = 1$), nous considérons que la contrainte $x < y$ n'existe pas et que la solution suivante a été générée : $\{x = 2, y = 1, z = 1, t = 3\}$. L'étape suivante ($E = 2$), la contrainte ($x < y$) est ajoutée. En suivant la méthode de recherche locale, il faut choisir une contrainte insatisfaite par l'affectation courante (solution précédente dans le cadre dynamique), changer la valeur d'une variable v non fixée intervenant dans cette contrainte et fixer v . Nous nous basons ici sur un mécanisme de retour arrière. Au début, la contrainte $x < y$ est insatisfaite. Étant donné que le domaine de x comprend seulement la valeur 2 ou qu'on ne peut pas proposer de valeurs alternatives pour x , il faut alors désaffecter y et lui affecter une

valeur de son domaine non encore explorée en minimisant le nombre de contraintes en conflit. Si nous affectons y à la valeur 2, deux contraintes seront insatisfaites ($x < y$ et $y \leq z$) ; par contre si nous affectons y à la valeur 3, seule la contrainte $y \leq z$ est insatisfaite. La variable y est alors affectée à la valeur 3 et par la suite $y \leq z$ est maintenant violée. Étant donné que la valeur de y est fixée à la valeur 3, z doit être désaffectée et réaffectée à une valeur qui minimise le nombre de contraintes insatisfaites. Si nous affectons z à la valeur 3, seule la contrainte $z \neq t$ est insatisfaite ; par contre si nous affectons z à la valeur 2, la contrainte $y \leq z$ reste encore violée et un backtrack sur z sera nécessaire. Nous affectons alors z à la valeur 3, ce qui entraîne la violation de la contrainte $z \neq t$. Comme la valeur de z a été fixée à 3, t sera alors désaffectée puis affectée à la valeur 4. La [figure II.4](#) permet d'illustrer cette méthode.

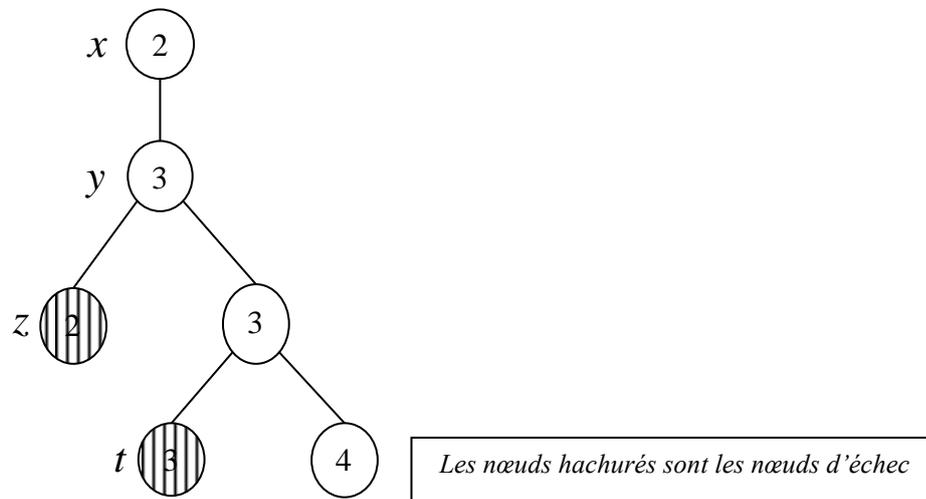


Figure II.4. Méthode de recherche locale [Verfaillie et Jussien, 2005]

iii. La méthode par relaxation-affectation de variables

Cette méthode a été proposée sous le nom de *local changes lc* dans [Schiex, 1994]. Elle s'appuie sur un mécanisme de retour arrière particulier. Son principe est le suivant : l'affectation d'une valeur val à une variable v n'est possible que si les variables dont l'affectation est incompatible avec celle de v peuvent être désaffectées et réaffectées sans modifier celle de v , ceci en ne tenant aucun compte de l'ordre d'affectation. Nous reprenons l'exemple précédent ([figure II.3](#)) pour illustrer cette méthode ([figure II.5](#)).

Si nous partons de la solution précédente produite à l'étape $E = 1$, au début seule la contrainte $x < y$ est violée. Les variables x et y doivent être respectivement désaffectées et réaffectées. Étant donné que la variable x ne peut pas être désaffectée (car elle n'a qu'une seule

valeur dans son domaine), nous désaffectons alors la variable y et nous l'affectons à 2. Par la suite, les deux contraintes ($x < y$ et $y \leq z$) sont violées. L'échec est inévitable dans cette branche étant donné que la variable y a déjà été désaffectée. Un retour arrière étant nécessaire, nous affectons alors y à la valeur 3. La contrainte $x < y$ n'est plus violée et seule la contrainte $y \leq z$ est insatisfaite. La variable z sera alors désaffectée et réaffectée à la valeur 2. La contrainte reste encore insatisfaite et un retour arrière est nécessaire étant donné que z a été désaffectée. Cependant, si nous choisissons la valeur 3 pour z , cette contrainte sera satisfaite et la contrainte $z \neq t$ sera alors violée. L'affectation de la valeur 4 à t permet de satisfaire cette contrainte et de générer la solution suivante : $\{x = 2, y = 3, z = 3, t = 4\}$. La (figure II.5) illustre cette méthode.

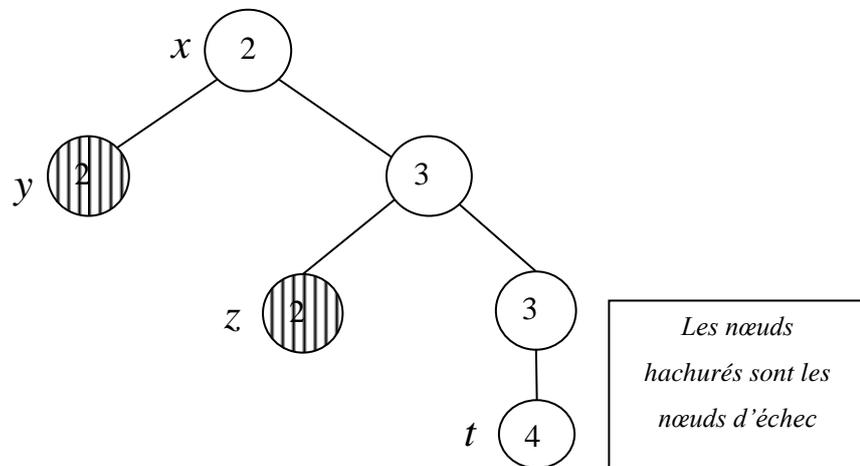


Figure II.5. Méthode par relaxation-affectation de variables [Verfaillie et Jussien, 2005]

II.4.2. Approche par réutilisation du raisonnement

Comme nous l'avons vu dans la partie II.3 et étant donné qu'un DCSP est défini d'une façon incrémentale, il est souhaitable d'éviter d'effectuer la recherche de zéro pour chaque modification du problème initial. En effet, une restriction ne pose aucun problème parce que lors de l'ajout d'une contrainte, les propagations à faire sont uniquement dues à la contrainte ajoutée. Par contre, une relaxation nécessite une réintroduction des valeurs éliminées précédemment. Pour cela, il paraît judicieux de fournir des informations sur les raisons des retraits de valeurs lors des recherches précédentes. L'objectif est donc de limiter les réintroductions et la méthode générale comprend trois phases : *réintroductions de valeurs*, *propagation des réintroductions* et *nouveau filtrage*.

Une deuxième approche basée sur une mémorisation du raisonnement a été proposée. Elle consiste à mémoriser des contraintes qui sont produites lors de la résolution du problème P_i (contraintes induites) et qui sont des conséquences des contraintes explicites de P_i et à les réutiliser dans la recherche courante pour la résolution du problème P_{i+1} . Cette approche regroupe plusieurs méthodes qui ne diffèrent l'une de l'autre que par le type des informations stockées avec chaque contrainte induite. Nous pouvons citer les méthodes basées sur les justifications et les méthodes basées sur les explications [Verfaillie et Jussien, 2005].

i. Les méthodes basées sur les justifications

Elles utilisent une justification qui a été enregistrée avec chaque contrainte induite c' pour déterminer si c' doit être remise en question. La justification d'une contrainte c' est l'ensemble des contraintes ayant servi directement à la générer (contraintes initiales et contraintes induites) ([Bessière, 1991], [Bessière, 1992], [Debruyne, 1996]).

ii. Les méthodes basées sur les explications

La principale différence entre cette méthode et la méthode basée sur les justifications est la nature de l'information enregistrée avec chaque contrainte induite c' . Alors que les justifications ne prennent en compte que la contrainte impliquée directement lors du retrait, les explications remontent jusqu'aux décisions responsables. En effet, elle enregistre l'ensemble des contraintes qui sont logiquement responsables de la génération de la contrainte induite c' ([Debruyne *et al.*, 2003], [Jussien et Lhomme, 2002]).

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre notionnel d'une approche par contraintes. La première partie est consacrée à la présentation des problèmes de satisfaction de contraintes et à leurs méthodes de résolution. La deuxième partie de ce chapitre a permis d'introduire l'aspect dynamique nécessaire à la modélisation des problèmes réels sujets à des aléas. Nous avons défini les CSP dynamiques et ses différentes extensions telles que les CSP conditionnels, les OCSP, les TSCP, les MCSP et les BCSP. Nous avons présenté les différentes approches existantes pour la résolution des DCSP, basées sur la réutilisation de solutions ou sur la réutilisation de contraintes.

Les problèmes de satisfaction de contraintes, présentés dans ce chapitre, ont servi de base à la modélisation de l'approche de planification dynamique que nous avons adoptée dans le cadre de ce travail. Dans l'objectif de répondre aux problèmes de perturbations qui caractérisent certaines données, notre structure décisionnelle à deux niveaux a été modélisée sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes dynamiques. Plus précisément, le premier niveau de décision a été modélisé comme un problème de satisfaction de contraintes conditionnelles. Pour les deux niveaux de décision, il s'agit d'un problème d'optimisation et non d'un problème de satisfaisabilité. La méthode de résolution est basée sur la mémorisation et la réutilisation des solutions, plus particulièrement une méthode de recherche locale. En effet, l'approche par réutilisation de solutions vise à améliorer la stabilité et l'efficacité, alors que l'approche par réutilisation de contraintes ne cherche qu'à améliorer l'efficacité ([Bellicha, 1993], [Wallace et Grimes, 2010]). Etant donné que la stabilité de la solution est un critère d'une grande importance dans le domaine de la planification de la production [Wallace et Grimes, 2010], nous avons opté pour l'approche par réutilisation de la solution.

CHAPITRE III.

APPROCHE INTEGREE POUR LA PLANIFICATION DYNAMIQUE : CONCEPTS ET MODELES

III.1. Introduction

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de situer notre travail dans le cadre de la gestion des chaînes logistiques et d'identifier les problématiques sous-jacentes couvrant différents horizons pour la prise de décision. Le deuxième chapitre a présenté le cadre notionnel d'une approche par contraintes. Dans ce chapitre, nous proposons un système d'aide à la décision permettant au décideur de dresser des plannings de production dans un contexte dynamique, tout en tenant compte de certains objectifs tels que la réduction du coût, du stock, ou encore l'amélioration des services.

Nous proposons un modèle de planification d'une chaîne logistique, basé sur une structure décisionnelle à deux niveaux, tactique et opérationnel. Le premier niveau planifie la production en recherchant le meilleur compromis entre les leviers décisionnels disponibles liés aux aspects capacité et coût de production. Le deuxième niveau établit un ordonnancement des opérations de fabrication des produits en minimisant les en-cours. L'interaction entre les deux niveaux est établie par des contraintes de conservation d'énergie.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. Nous commençons par rappeler les objectifs de l'étude. Nous présentons ensuite la structure de la chaîne logistique étudiée et les décisions qui y sont associées. Par la suite, nous étudions le processus de prise de décision et les différents délais correspondants. Enfin, nous introduisons le principe général du processus de planification dynamique à horizon glissant et nous proposons un modèle mathématique qui traduit notre approche intégrée de planification dynamique.

III.2. Objectifs de l'étude

La planification des chaînes logistiques consiste à prendre des décisions coordonnées tout au long de la chaîne et se décline traditionnellement selon trois niveaux hiérarchiques : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. La planification met généralement en œuvre un grand nombre de décisions de natures variées (e.g. définition des quantités à produire en interne, définition des quantités à sous-traiter, définition des niveaux de capacités adéquats, définition des quantités de produits à stocker, etc.) soumises à de nombreuses contraintes (e.g. capacités de production, satisfaction des clients, prise en compte des coûts, prise en compte des délais de production, etc.). Il est important donc de développer

un outil d'aide à la décision qui permet de définir les meilleures décisions compte tenu des aspects capacité et coûts de production. Habituellement, les décisions prises au niveau planification sont ensuite transmises au niveau ordonnancement, lequel met en œuvre les moyens de l'atelier pour suivre au mieux le plan de production. Cependant, les décisions de planification et d'ordonnancement sont souvent traitées indépendamment les unes des autres. Les contraintes de capacité sont définies, d'une façon trop agrégée au niveau planification et ne garantissent pas que le plan de production soit réalisable au niveau inférieur.

De plus, la gestion de la chaîne logistique est souvent confrontée à la présence d'aléas concernant la capacité des ressources, les délais, les demandes des clients, etc. Cela, peut engendrer des perturbations des systèmes de production, et des changements importants des activités déjà engagées. Une certaine stabilité de l'organisation doit être donc garantie par les solutions proposées suite aux perturbations, permettant ainsi aux activités de s'adapter dynamiquement aux différents aléas (cf. [figure III.1](#)).

Nous proposons un modèle de planification d'une chaîne logistique, basé sur une structure décisionnelle à deux niveaux. Cette approche adopte un processus dynamique qui permet de réagir aux différentes perturbations en actualisant les données à chaque étape de planification. Les objectifs de l'approche proposée sont de:

1. Répondre aux problèmes d'incohérence entre les décisions des niveaux planification et ordonnancement en vue de garantir la faisabilité du plan de production;
2. Assurer une planification optimale vis-à-vis d'un critère financier et un ordonnancement agrégé optimal qui minimise les en-cours de production tout en assurant la stabilité et la robustesse de la solution face aux variations de certaines données.

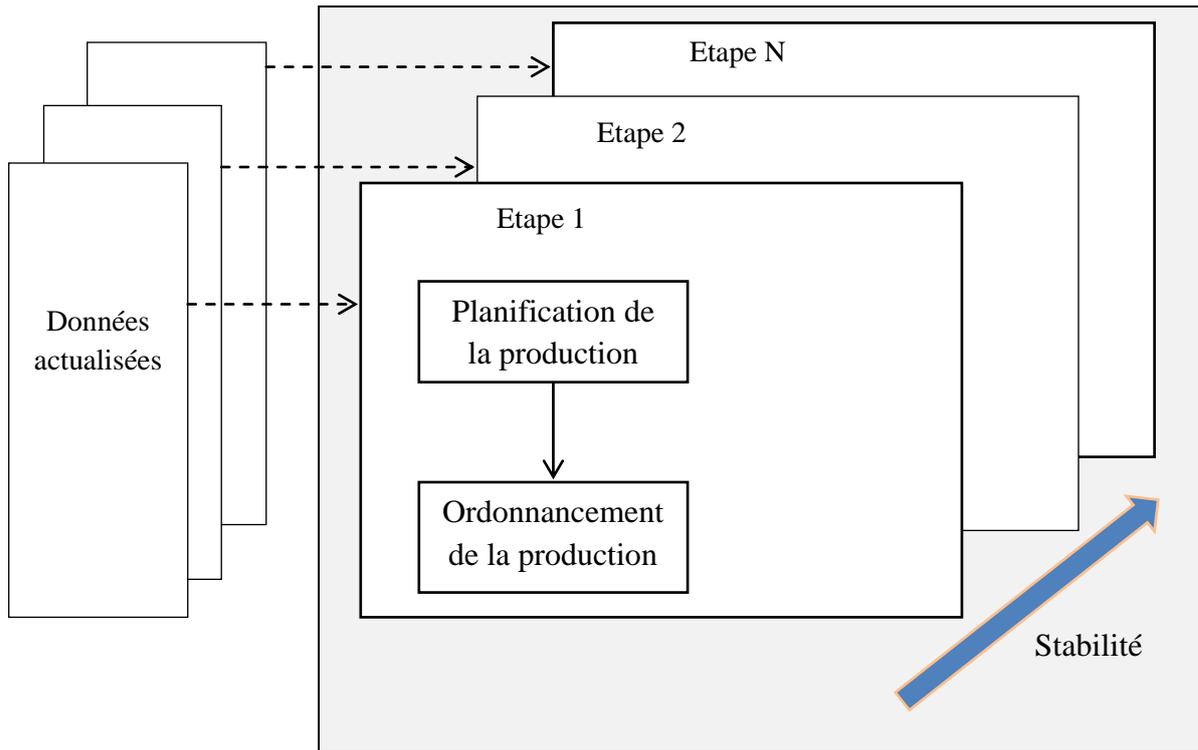


Figure III.1. Processus de planification dynamique

III.3. Approche proposée : structure décisionnelle à deux niveaux

III.3.1. Structure de la chaîne logistique considérée

Dans ce paragraphe, nous présentons un ensemble d'hypothèses sur le type de chaîne logistique que nous considérons, et nous en donnons un exemple en [figure III.2](#). Cette chaîne est limitée à trois types d'acteurs :

- une entreprise composée de plusieurs sites de productions,
- un ensemble de clients pour l'entreprise,
- des sous-traitants pour chaque site de production.

L'entreprise se compose de plusieurs sites de production réalisant différents types d'opérations de fabrication sur les produits. Plus précisément, on suppose que la réalisation d'un produit nécessite une succession d'opérations, chacune d'elles étant réalisée sur un site donné. Dans l'exemple de la [figure III.2](#), la réalisation du produit *B* est répartie sur plusieurs sites (1, 2, 4 et 5). Un site est globalement défini par sa capacité de production. La capacité de

production (*i.e.*, de réalisation d'une opération) est le nombre de ressources (*i.e.*, de machines) du site.

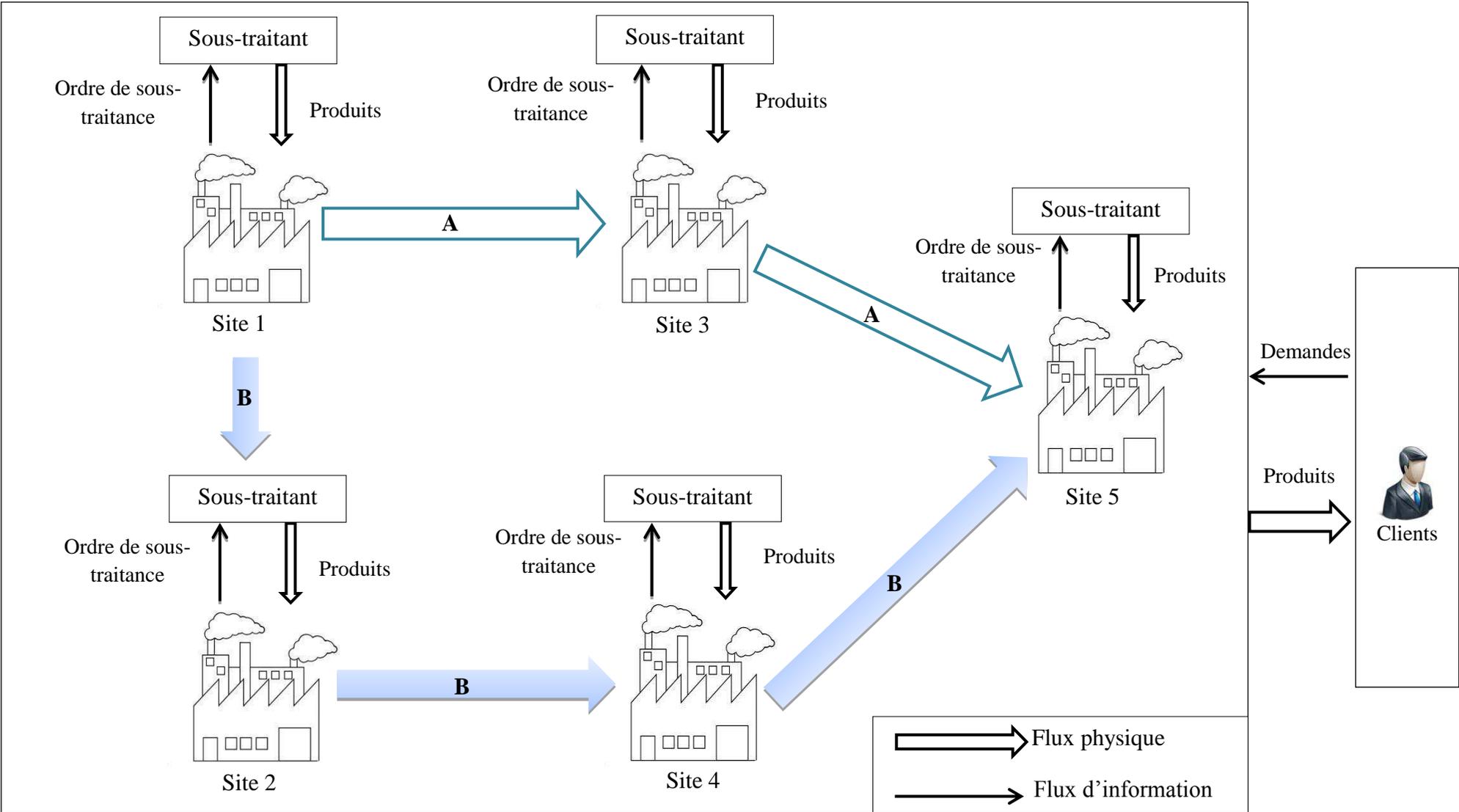


Figure III.2. Structure de la chaîne

Chaque site a la possibilité de recourir à la sous-traitance et/ou à l'utilisation d'heures supplémentaires. Dans le cas de la sous-traitance, le site ne fournit pas à son sous-traitant les composants nécessaires pour la fabrication des produits souhaités. La notion d'arriéré de production est prise en compte. Les arriérés sont assimilés à des quantités en rupture permettant de modéliser les retards dans la satisfaction des demandes.

Nous considérons le cadre d'une entreprise au sein de laquelle il existe un service logistique central assurant la planification des charges de production et son ordonnancement agrégé. Il s'agit de répartir et de coordonner les productions sur les différents sites tout en laissant à chaque site une autonomie au niveau de l'ordonnancement local détaillé.

III.3.2. Processus et leviers décisionnels considérés

Nous structurons le processus de planification sous la forme de deux niveaux de décision. Sur un horizon de planification discrétisé en périodes, le premier niveau de décision consiste à planifier les volumes de produits à traiter, pour chaque produit et pour chaque site de production, tout en respectant les capacités des différents sites de production, qui sont définies sous la forme d'un nombre d'heures de travail disponibles. La capacité correspond à la définition d'un régime de fonctionnement nominal pour l'entreprise (*i.e.*, un temps d'ouverture de 8 heures par jour et une seule équipe de travail). Le premier niveau détermine aussi les volumes de production sous-traités et le nombre d'heures supplémentaires utilisées à chaque période de l'horizon de planification et pour chaque site de production. Les heures supplémentaires ne peuvent pas dépasser une limite maximale définie pour chaque site et pour chaque période. La capacité de sous-traitance est définie par un nombre de produits maximum par période. Nous introduisons un coût correspondant à chaque type de décision et c'est en termes de coût qu'une solution est considérée comme plus favorable qu'une autre: il s'agit de trouver une solution qui minimise le coût total des opérations.

Le deuxième niveau consiste à ordonnancer pour l'ensemble des sites de production, sur un horizon discrétisé en périodes plus courtes, les dates de début des opérations de fabrication tout en respectant la limitation de la capacité des ressources de fabrication (nombre de machines par site). Dans chaque site de production, nous considérons un seul type de machines parallèles. Il s'agit alors de trouver une solution optimale qui respecte à la fois les contraintes cumulatives des ressources sur chaque site de production mais aussi les contraintes de précedence issues des gammes. La fonction objectif est la minimisation de la

somme des dates de fin. La poursuite de cet objectif favorise la maximisation du débit de production et la minimisation des stocks de produits intermédiaires ou d'en-cours, produits non terminés, présents dans le site. Si nous considérons que chaque tâche i est associée à un temps de traitement $p_i > 0$, le problème revient à minimiser la quantité $\sum C_i$, où C_i représente la date de fin de l'opération i ([Zaidi *et al.*, 2010], [Mokhtari *et al.*, 2012]).

Exemple : si l'on considère 3 tâches telles que $p_1 = 3$, $p_2 = 2$, $p_3 = 6$, alors l'ordonnancement 1 - 2 - 3 est tel que : $C_1 = p_1 = 3$, $C_2 = C_1 + p_2 = 5$, et $C_3 = C_2 + p_3 = 11$ (cas a) de la figure III.3. Ainsi, on a : $\sum C_i = 19$. Si l'on considère l'ordonnancement 2 - 1 - 3, alors il est tel que : $\sum C_i = 2 + 5 + 11 = 18$ (cas b) de la figure III.3. Par rapport au cas a), la somme des dates de fin des tâches a diminué d'une unité et par la suite les encours ont diminué d'une unité.

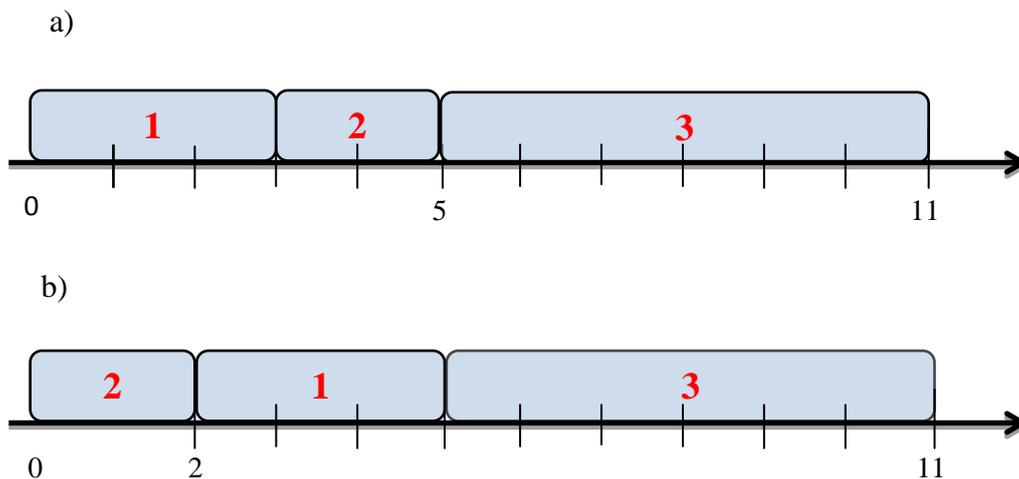


Figure III.3. Minimisation des en-cours [Moncel, 2010]

III.4. Planification dynamique

III.4.1. Processus de prise de décision

Dans sa thèse, Hassen Gharbi indique que, dans un contexte industriel réel, *la prise de décision est une action instantanée effectuée en passant par différentes phases et que ce caractère multi-phase est imposé par des contraintes techniques des moyens de production et des contraintes socio-économiques* qui imposent des délais temporels avant lesquels une certaine décision ne peut être réalisée. Il cite des exemples de contraintes imposant des délais temporels sur les décisions comme les temps de préparation des composants nécessaires pour

la production d'un produit p , les délais de préparation du personnel permanent ou intérimaire en cas de recours aux heures supplémentaires [Gharbi, 2012]. Ainsi, la prise de chacune des décisions du plan de production passe nécessairement par deux phases : la phase d'anticipation de la réalisation et la phase de réalisation effective de la décision. Si une décision est prise à une période τ , sa réalisation commence à $\tau + DA$ et finit à $\tau + DA + DR$. DA est le délai d'anticipation et DR est le délai de réalisation (figure III.4).

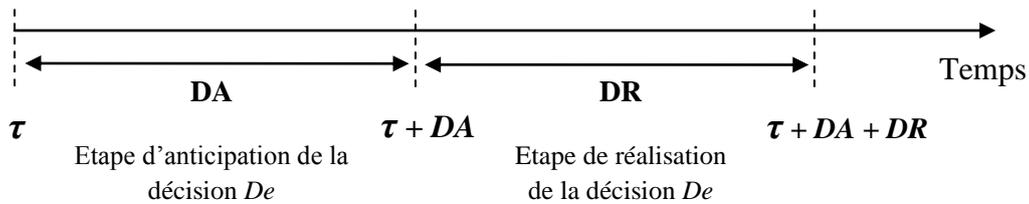


Figure III.4. Phases de prise de décision [Gharbi *et al.*, 2009]

i. La phase d'anticipation de la réalisation de la décision

La phase d'anticipation est la phase qui précède la réalisation effective de la décision. Comme le montre la figure III.4, elle est caractérisée par une date de début τ et une durée (délai d'anticipation) DA . Ce besoin d'anticipation se retrouve notamment dans le recours à la sous-traitance. Un sous-traitant doit être prévenu à l'avance pour qu'il puisse organiser sa production et intégrer les éventuelles modifications de sa demande.

ii. La phase de réalisation effective de la décision

Elle correspond à la durée de la réalisation d'une décision qui peut durer un certain nombre de périodes. La date de fin de la phase d'anticipation ($\tau + DA$) est la date de début de la phase de la réalisation d'une décision De . Elle s'achève après une durée de réalisation ou un délai d'obtention DR (figure III.4). Il est à noter que les délais d'obtention concernent essentiellement les décisions de fabrication et que les décisions organisationnelles telles que le recours aux heures supplémentaires sont mises en œuvre juste après la phase d'anticipation [Galasso, 2007]. Dans la suite, nous noterons par LPp , le délai d'obtention s'il s'agit d'une décision de production interne et par LSp le délai d'obtention s'il s'agit d'une décision de sous-traitance.

III.4.2. Planification à horizon glissant

Classiquement, la planification de la production permet de définir des plans de production couvrant un horizon de planification HP constitué de T périodes. Ces plans sont obtenus en partant de certaines données comme les demandes clients (généralement connues à court terme et seulement estimées à moyen terme), la capacité de production, les différents coûts ainsi que les informations sur le produit (nomenclature, délai d'obtention, ...). Ces données sont généralement incertaines et pour limiter l'influence de cette incertitude, nous adoptons dans le cadre de cette thèse, un processus de planification dynamique qui nous permet de suivre et de contrôler la faisabilité des décisions prises.

La planification dynamique s'inscrit dans le cadre d'une procédure à horizon glissant permettant une actualisation périodique des données. En effet, les décisions prises sur un horizon de planification HP de longueur T sont remises en cause à intervalles de temps réguliers et une nouvelle planification est calculée sur un nouvel horizon de même longueur mais décalé de Pa périodes, Pa étant le pas de planification. Ainsi, lors de la première planification ($k = 0$), les plans sont calculés : le décideur reçoit le plan de demande prévu sur le premier horizon de planification HP^1 et détermine les différents plans sur l'ensemble des périodes appartenant à horizon HP^1 . La mise à jour périodique des plans fait que toute nouvelle planification (k) est réalisée sur un horizon de temps $HP^k = \varphi, \varphi+1, \varphi+2, \dots, \varphi + T - 1$ avec $\varphi = k.Pa + 1$, et k : numéro d'itération de la planification (figure III.5) [Amrani-Zouggar, 2009].

Le *pas de planification* Pa est le nombre de périodes qui sépare deux itérations successives de planification. Son choix est délicat. En effet, le pas de planification a une influence sur la stabilité et la réactivité de la solution. Selon [Galasso, 2007], *le choix d'un pas de planification long entraîne le gel de décisions lointaines. Cela assure la stabilité des plans, mais les répercussions d'une modification de la demande ne se feront sentir que plus tardivement sur les autres acteurs de la chaîne.* Dans [Thierry, 2003], l'auteur indique qu'*en théorie la périodicité maximale envisageable correspond à la longueur de l'horizon de planification et qu'il est souvent souhaitable d'augmenter la fréquence de planification pour prendre en compte les aléas le plus tôt possible.* Dans l'exemple de la figure III.5, nous décrivons un processus de planification dynamique avec un horizon de planification HP de taille $T = 10$ périodes et un pas de planification $Pa = 2$ périodes.

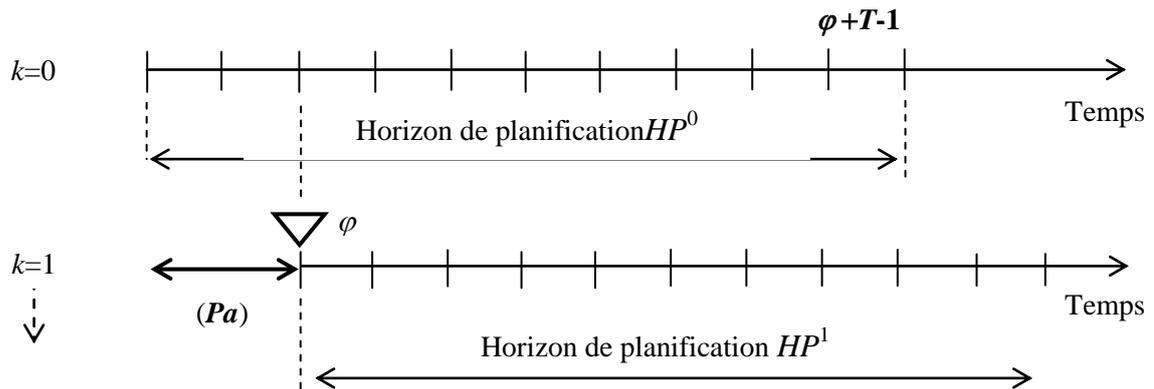


Figure III.5. Processus de planification dynamique [Amrani-Zouggar, 2009]

Lorsque la planification est mise en œuvre en horizon glissant, seules les décisions correspondant au début de l'horizon de planification (horizon gelé HG) sont réellement implémentées. Un horizon gelé HG correspondant au délai d'anticipation de la décision considérée. Ces décisions sont dites « gelées » c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être remises en cause par les planifications ultérieures. La présence d'un horizon gelé est intéressante pour limiter la nervosité du système en empêchant les modifications tardives qui perturbent les activités [Fontan *et al.*, 2001]. Ainsi, [Galasso, 2007] considère qu'à chaque pas de planification et pour chaque type de décision, nous pouvons décomposer un horizon de planification en deux sous-horizons : un horizon gelé HG tel que : $HG = \{\varphi, \varphi+1, \dots, \varphi+DA-1\}$ et un horizon libre HL sur lequel, les décisions peuvent être remises en cause dans le but de réagir aux fluctuations.

Dans la [figure III.6](#), nous reprenons l'exemple précédent ([figure III.5](#)) avec un horizon de planification de 10 périodes, un pas de planification Pa de 2 périodes et un délai d'anticipation de la décision égal à 3. Les décisions 4 et 5 prises librement au premier pas de planification sont gelées et reportées sans modifications au deuxième pas de planification.

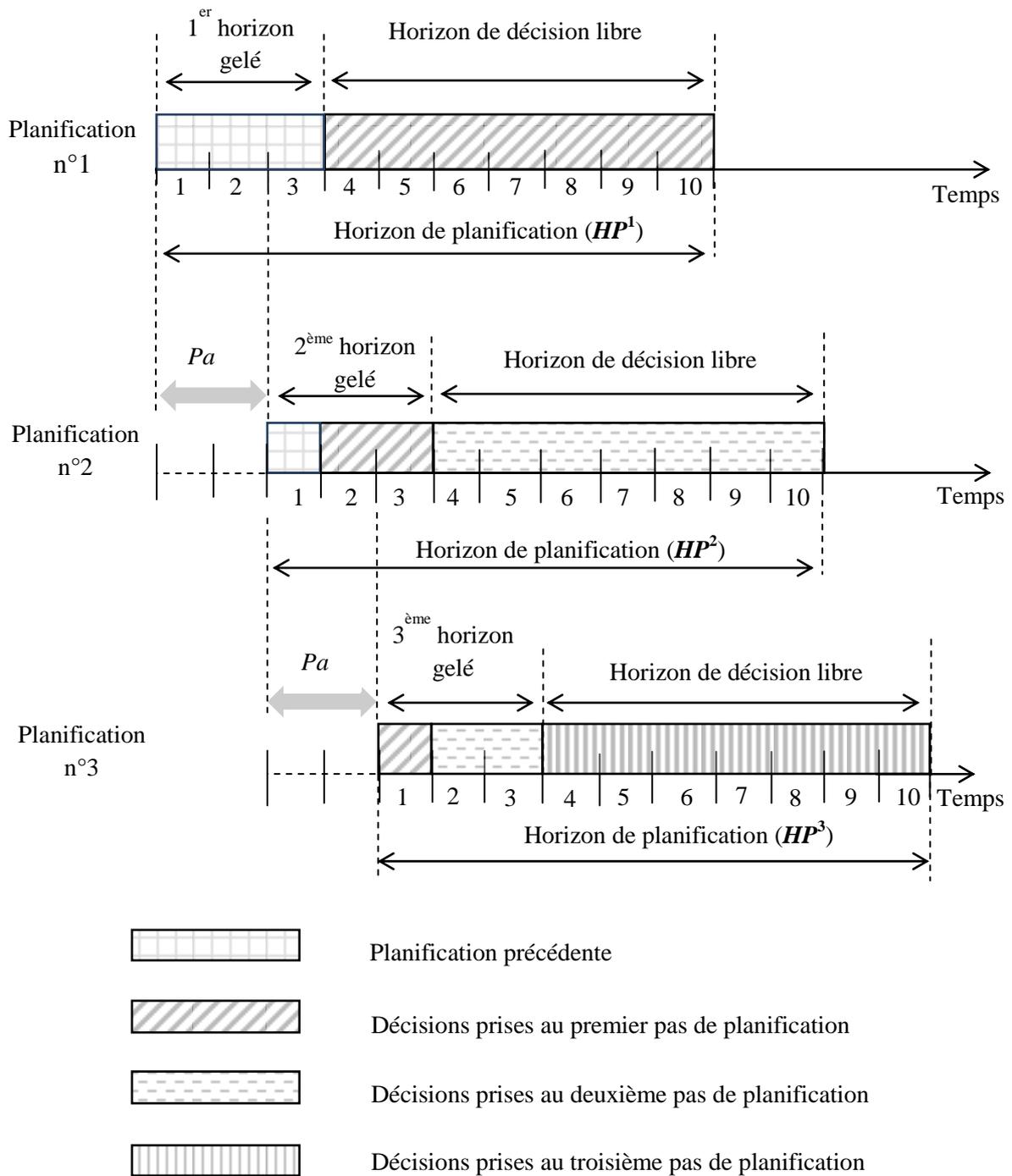


Figure III.6. Horizon de décision gelé, d'après [Thierry, 2003]

III.4.3. Procédure de planification

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une procédure itérative (figure III.7) sur un horizon de planification HP sur lequel les demandes sont supposées connues. Un pas de planification Pa sépare deux itérations successives.

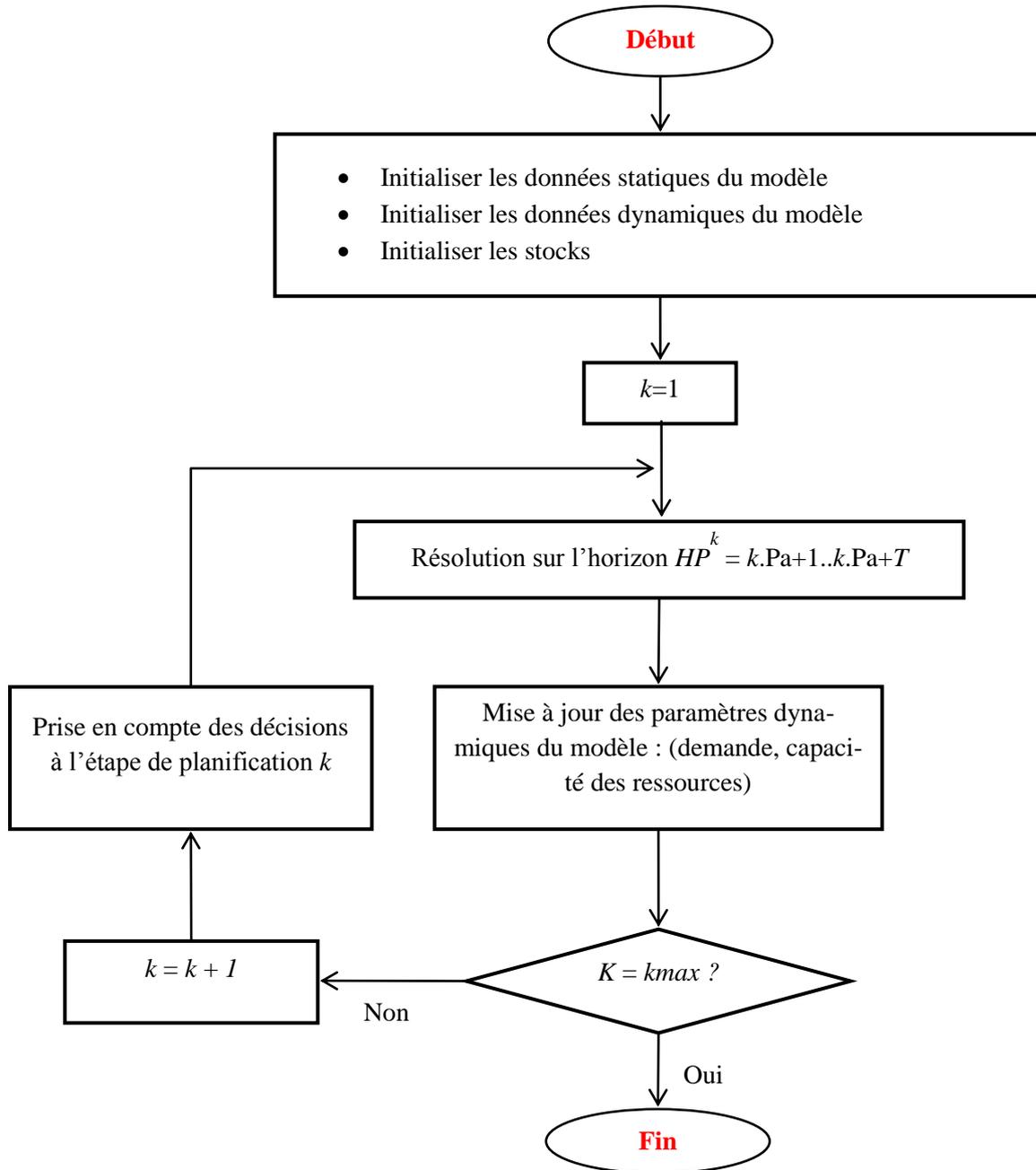


Figure III.7. Approche proposée

La procédure débute par une initialisation des différentes données statiques et dynamiques du problème ainsi que la définition des stocks initiaux. La première planification ($k=1$) est effectuée sur la base des données de l'horizon de planification correspondant HP^1 (demandes, coûts, capacités) commençant à la période ($T=1$), avec $HP^1 = \{1, 2, \dots, T\}$. On passe ensuite à la deuxième étape de planification ($k=2$) que l'on effectue sur la base des données actualisées de l'horizon HP^2 commençant à la période ($T+Pa$), avec $HP^2 = \{1+Pa, 2+Pa, \dots, T+Pa\}$. La deuxième itération de planification prend en compte les décisions prises à l'étape de planification précédente tels que : les décisions gelées à l'itération $k=1$ sont reportées sans modifications à la deuxième itération de planification. Cette procédure itérative prend fin lorsque nous atteignons le nombre maximum d'itérations ($Kmax$), avec : $Kmax = \frac{(HD-T)}{PA} + 1$ où HD est le nombre de périodes sur lesquelles la demande est supposée connue.

III.5. Modélisation du processus de planification dynamique

Dans ce paragraphe, nous présentons le modèle de planification dynamique développé. En suivant la structure du modèle en deux niveaux, nous commençons par la présentation du premier niveau. Il planifie la production en recherchant le meilleur compromis entre les leviers décisionnels disponibles liés aux aspects capacité et coût de production. Ensuite, nous décrivons le deuxième niveau d'ordonnancement agrégé des opérations de fabrication minimisant les en-cours. Le recours à une structure décisionnelle intégrée nous a conduit à établir une interaction entre les niveaux supérieur et inférieur de décision, mise en œuvre par des contraintes dites de conservation d'énergie. Elle est présentée à la troisième partie de ce paragraphe.

III.5.1. Modèle planification de la production : Premier niveau de décision

Ce modèle correspond au problème de planification à résoudre à chaque itération de planification k , sur l'horizon de planification HP^k . Dans ce modèle, la demande est supposée connue sur l'ensemble de l'horizon de planification et est mise à jour à chaque itération de planification. Nous détaillons ci-dessous les paramètres, les variables de décision et les contraintes de ce niveau.

i. PARAMETRES

- $\{p\} = I..P$: ensemble des produits finis p ,
- $\{s\} = I..S$: ensemble des sites de production de la chaîne logistique,
- $\{Routage_p\}$: séquence des sites de production sur lesquels passe le produit p ,

✓ Paramètres temporels

- k : numéro d'itération de la planification,
- T : nombre de périodes dans l'horizon de planification,
- HP : horizon de planification,
avec : $HP = \{1, 2, \dots, T\}$
- HG : horizon gelé associé à chaque type de décision,
avec : $HG = \{1, 2, \dots, DA\}$
où DA est le délai d'anticipation de la décision
- $Pa(\tau)$: pas de planification (nombre de périodes qui sépare deux itérations successives de planification),
- HD : nombre de périodes sur lesquelles la demande est supposée connue,
avec : $HD = (k^{max} - 1) * Pa + T$
et : k^{max} = nombre maximum d'itérations de planification
- LPP, LSP : délais d'obtention du produit fini p lorsqu'il est respectivement fabriqué en interne ou sous-traité.

✓ Paramètres statiques

- $C_{t,s}$: capacité de production interne pour chaque site de production (nombre d'heures de travail disponibles),
- $ST_{p,t,s}$: le volume de production maximal du produit p en sous-traitance en période t sur le site de production s ,
- $Hmax_s$: nombre maximal d'heures supplémentaires pour chaque site de production,
- $h_{p,s}$: durée de fabrication unitaire d'un produit p sur chaque site s ,
- $i_{p,s}$: coût unitaire de stockage du produit p sur le site s ,
- $g_{p,s}$: coût unitaire de rupture du produit p sur le site s ,
- $x_{p,s}$: coût unitaire de fabrication du produit p sur le site s ,
- $s_{p,s}$: coût unitaire de sous-traitance du produit p sur le site s ,

- e_s : coût d'utilisation d'une heure supplémentaire sur un site s .

✓ Paramètres dynamiques (mis à jour à chaque itération de planification k)

- $D_{p,t}^k$: demande globale du produit fini p pour la période t .

ii. VARIABLES DE DECISION A L'ITERATION k DE PLANIFICATION

- $X_{p,t,s}^k$: quantité de produits p lancés en production interne en période t sur le site s ,
- $S_{p,t,s}^k$: quantité de produits p lancés en sous-traitance interne en période t sur le site s ,
- $H_{t,s}^k$: nombre d'heures supplémentaires utilisées en période t sur le site s ,
- $I_{p,t,s}^k$: niveaux de stock en fin de période t pour le produit fini p sur le site s ,
- $G_{p,t,s}^k$: niveaux de rupture en fin de période t pour le produit fini p sur le site s ,
- B^k : variable binaire = 1 si la contrainte d'activation est vraie en période t , 0 sinon.

iii. CONTRAINTES

✓ Contrainte de conservation de stock

$$I_{p,t,s}^k - G_{p,t,s}^k = I_{p,t-1,s}^k - G_{p,t-1,s}^k + X_{p,t-LP,s}^k + S_{p,t-LS,s}^k - D_{p,t}^k \quad \forall p, \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HP}^k \quad (1)$$

✓ Contrainte de limitation de la capacité

$$\sum_{p=1}^P h_{p,s} * X_{p,t,s}^k \leq C_{t,s} + H_{t,s}^k \quad \forall p, \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HP}^k \quad (2)$$

✓ Contrainte de respect du volume de production maximal du sous-traitant

$$S_{p,t,s}^k \leq ST_{p,t,s} \quad \forall p, \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HP}^k \quad (3)$$

✓ Contrainte de respect du nombre d'heures supplémentaires maximal alloué par période

$$H_{t,s}^k \leq H_{\max_s} \quad \forall s, \forall t \in \text{HP}^k \quad (4)$$

✓ Contrainte d'activation (désactivation) de l'action de sous-traitance

$$\sum_{p=1}^P h_{p,s} * D_{p,t}^k > C_{t,s}^k + H_{t,s}^k \Rightarrow S_{p,t-LS,s}^k > 0 \quad \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HP}^k \quad (5)$$

✓ Relations de passage entre deux itérations de planification k et k+1

$$X_{p,t,s}^{k+1} = X_{p,t+Pa,s}^k \quad \forall p, \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HG}^k \quad (6)$$

$$S_{p,t,s}^{k+1} = S_{p,t+Pa,s}^k \quad \forall p, \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HG}^k \quad (7)$$

$$H_{t,s}^{k+1} = H_{t+Pa,s}^k \quad \forall s \in \text{Routage}_p, \forall t \in \text{HG}^k \quad (8)$$

✓ Fonction objectif

$$\min \sum_{t=0}^{T-1} \left[\sum_{p=1}^P \left[\sum_{s \in \text{Routage}_p} i_{p,s} * I_{p,t,s}^k + g_{p,s} * G_{p,t,s}^k + x_{p,s} * X_{p,t,s}^k + s_{p,s} * S_{p,t,s}^k + e_s * H_{s,t}^k \right] \right] \quad \forall k \quad (9)$$

La contrainte (1) garantit la conservation de la matière : le stock au début de la période t ($I_{p,t,s}^k$) moins le stock en rupture à la fin de la période t ($G_{p,t,s}^k$) est égal au stock au début de la période $t-1$ ($I_{p,t-1,s}^k$) moins le stock en rupture à la fin de la période $t-1$ ($G_{p,t-1,s}^k$) plus les quantités de produits p lancés en période $(t-LP)$ ($X_{p,t-LP,s}^k$) plus les quantités de produits p sous-traités en période $(t-LS)$ ($S_{p,t-LS,s}^k$) sur le site s moins la demande en produit p sur la période t .

La contrainte (2) permet de vérifier que, dans chaque période de l'horizon de planification HP et pour chaque site de production s , la capacité de production interne augmentée des heures supplémentaires est compatible avec la charge globale de production que doit assurer le site.

La contrainte (3) assure le respect du volume de production maximal du sous-traitant.

La contrainte (4) exprime le fait qu'à chaque période t , le volume d'heures supplémentaires utilisées ne doit pas dépasser la valeur maximale autorisée sur chaque site de production.

La contrainte (5) est une contrainte conditionnelle. Elle permet l'activation ou la désactivation de l'action de sous-traitance. En effet, si le nombre d'heures de travail nécessaire pour la réalisation de la demande en produits p dans la période t sur chaque site de production est supérieur à la capacité du site de production augmentée du nombre d'heures supplémentaires allouées, alors on a recours à la sous-traitance. Dans le détail, on a :

- prémisses : le nombre d'heures de travail nécessaire pour la réalisation de la demande en produits p dans la période t est supérieur (respectivement inférieur) à la capacité (au sens large) du site de production
- conséquent d'activation (respectivement désactivation) de l'action de sous-traitance : $S_{p,t,s}^k > 0$ (respectivement $S_{p,t,s}^k = 0$).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{p=1}^P h_{p,s} * D_{p,t}^k > C_{t,s}^k + H_{t,s}^k \Leftrightarrow B^k = 1 \\ S > 0 \qquad \qquad \qquad \Leftrightarrow B^k = 1 \end{array} \right.$$

Les contraintes (6) à (8) formalisent la cohérence des décisions entre deux itérations de planification successives (k) et ($k+1$) et ce, pour toutes les décisions (production en interne, sous-traitance et allocation d'heures supplémentaires). Elles expriment l'égalité entre les valeurs engagées en anticipation et les valeurs qui seront mises en œuvre à la réalisation

La fonction objectif (9) minimise la somme de tous les coûts sur tous les sites de production et sur toutes les périodes de l'horizon de planification HP .

III.5.2. Modèle ordonnancement agrégé : Deuxième niveau de décision

Le niveau inférieur établit un ordonnancement sur un horizon détaillé plus court que l'horizon de planification. Nous détaillons ci-dessous les paramètres, les variables de décision et les contraintes de ce niveau.

i. PARAMETRES

- $\{p\} = 1..P$: ensemble des produits finis p ,
- $\{s\} = 1..S$: ensemble des sites de production de la chaîne logistique,

- $\{Routage_p\}$: liste ordonnée des sites de production sur lesquels passe le produit p ,
- TD : nombre de périodes dans l'horizon d'ordonnancement agrégé ($TD < T$),
- HO^k : horizon d'ordonnancement agrégé à l'itération k $\{0..TD - 1\}$,
- K : nombre de périodes élémentaires dans une période,
- M_s : nombre maximal de machines pouvant être utilisées pour chaque site.

ii. VARIABLES DE DECISION A L'ITERATION k POUR UNE PERIODE t , UN PRODUIT p ET UN SITE s

- $Deb_{p,t,s}^k$: date de début de l'opération de fabrication du produit p sur le site s en période t ,
- $Fin_{p,t,s}^k$: date de fin de l'opération de fabrication du produit p sur le site s en période t ,
- $E_{p,t,s}^k$: quantité consommée, par unité de ressource, pour la fabrication du produit p sur le site s ,
- $R_{p,t,s}^k$: intensité de consommation de ressource de production ; correspond au nombre de machines allouées à la fabrication du produit p sur le site s ,
- $L_{p,t,s}^k$: durée de fabrication du produit p sur le site s à la période t ; c'est une variable dépendante du nombre de machines allouées $R_{p,t,s}^k$.

iii. CONTRAINTES

✓ Contrainte de consommation de ressources

$$E_{p,t,s}^k = L_{p,t,s}^k * R_{p,t,s}^k \quad \forall p, \forall s \in Routage_p, \forall t \in HO^k \quad (10)$$

✓ Contraintes de limitation des capacités des sites

$$\sum_{p=1}^P R_{p,t,s}^k \leq M_s \quad \forall p, \forall s \in sites(Routage_p), \forall t \in HO^k \quad (11)$$

$$Fin_{p,t,s}^k \leq K \quad \forall p, \forall s \in sites(Routage_p), \forall t \in HO^k \quad (12)$$

✓ Contraintes de précédence

$$Deb_{p,t,s'}^k \geq Deb_{p,t,s}^k + L_{p,t,s}^k \quad \forall p, \forall (s, s') \in arcs(Routage_p), \forall t \in HO^k \quad (13)$$

Fonction objectif

$$\min_k \left(\max_s \left(\sum_{p=1}^{Nb_{Produits}} Fin_{p,t,s}^k \right) \right) \quad \forall k \quad (14)$$

La contrainte (10) exprime la relation existant entre la variation de la durée de fabrication du produit p sur le site s à la période t ($L_{p,t,s}^k$) en fonction du nombre de machines allouées pour sa réalisation ($R_{p,t,s}^k$).

La contrainte (11) permet de vérifier qu'à chaque site de production s et à tout instant, le nombre total des machines utilisées par un ensemble d'opérations en cours d'exécution en période t ne dépasse pas une certaine capacité limite M_s^k .

La contrainte (12) permet de vérifier que toutes les opérations de fabrication en période t sont achevées au cours de la même période t de planification.

La contrainte (13) impose un ordre entre deux opérations successives au sein d'une même gamme de fabrication pour chaque produit p .

La fonction objectif (14) cherche à minimiser les en-cours.

III.5.3. Interaction énergétique entre les deux niveaux de décision

Le recours à une structure décisionnelle intégrée nous a conduit à établir une interaction entre les niveaux supérieur (planification) et inférieur (ordonnancement agrégé). En s'appuyant sur un horizon discrétisé en périodes, le premier niveau de décision (planification) transmet au niveau inférieur (ordonnancement agrégé), à chaque période t , les quantités ($X_{p,t,s}^k$) à traiter sur chaque site s . Ces variables sont soumises à des contraintes de conservation d'énergie (équation 15), qui doivent être satisfaites par ce niveau inférieur de décision.

$$E_{p,t,s}^k = L_{p,t,s}^k * R_{p,t,s}^k = X_{p,t,s}^k * h_{p,s} \quad \forall p, \forall s \in Routage_p, \forall t \in HO^k \quad (15)$$

Il s'agit de gérer la production des sites de manière à suivre du mieux possible le plan généré par le niveau planification [Trojet *et al.*, 2012].

En effet, la contrainte (15) exprime l'égalité entre [la consommation de ressource] et [le travail correspondant à la quantité à lancer en période t]. Plus précisément, elle lie [la durée de fabrication du produit p ($L_{p,t,s}^k$) sur le site de production s et le nombre de ressources utilisées ($R_{p,t,s}^k$)] à la [quantité à lancer en fabrication du produit p sur le site s à la période t ($X_{p,t,s}^k$), et à la durée opératoire nécessaire pour la fabrication d'une unité du produit p ($h_{p,s}$)].

Dans l'exemple de la figure III.8, si nous considérons que $X_{p,2,s}$, décision générée par le premier niveau de décision, est la quantité à lancer en fabrication du produit p sur un site de production s à la deuxième période de l'horizon de planification HP , et que $h_{p,s}$ est la durée opératoire unitaire de fabrication du produit p sur un site s , alors la demande totale en énergie (consommation) $E_{p,2,s}$ d'un produit p sur le site s , à la deuxième période de l'horizon de planification, est égale au produit de $X_{p,2,s}$ et de $h_{p,s}$. Cette demande en énergie est transmise au deuxième niveau de décision. Sa faisabilité est vérifiée par son égalité au produit du nombre de ressources (machines) affectées sur le site s pour la réalisation du produit p ($R_{p,2,s}$) par la durée totale de fabrication du produit p sur le site s ($L_{p,2,s}$). La flèche en pointillés indique le changement de la valeur de $X_{p,2,s}$ en cas de non faisabilité. Cette interaction est réalisée au sein de la deuxième période de l'horizon de planification.

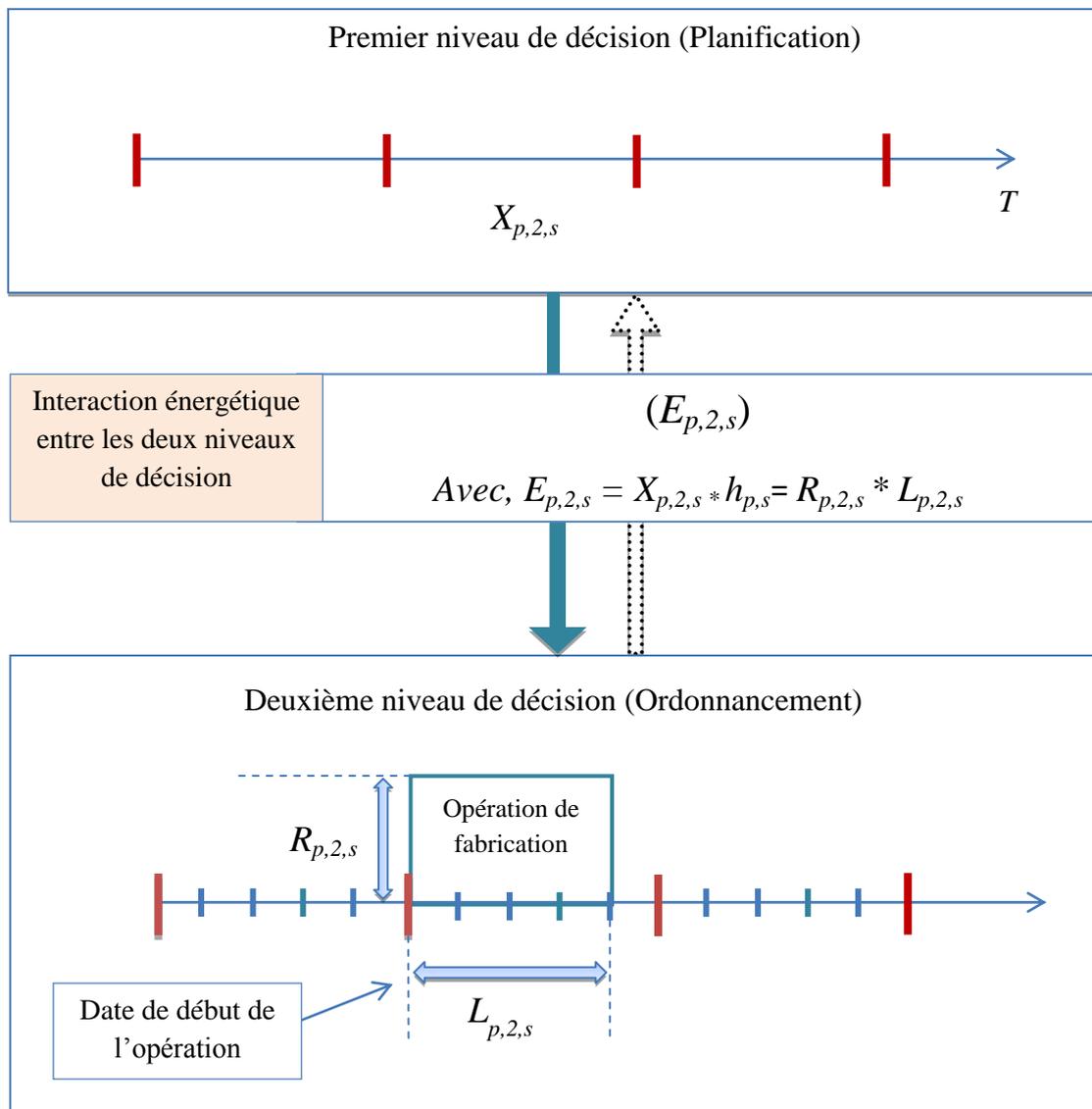


Figure III.8. Interaction énergétique entre les deux niveaux de décision

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la chaîne logistique adoptée dans le cadre de cette thèse. Cette chaîne est limitée à trois types d'acteurs : une entreprise composée de plusieurs sites de productions, un ensemble de clients et des sous-traitants. Ensuite, nous avons introduit deux délais qui caractérisent chaque type de décision à savoir les délais d'anticipation et les délais d'obtention et nous avons proposé et détaillé le principe d'un processus dynamique de planification qui intègre les différentes hypothèses et caractéristiques décisionnelles.

Sur cette base, nous avons présenté l'approche de planification dynamique de la chaîne logistique étudiée. Cette approche est fondée sur une structure décisionnelle à deux niveaux. Le premier niveau, tactique, se base sur un horizon de planification à moyen terme. Il permet de générer des décisions relatives à la production (quantités de produits à traiter, quantités à sous-traiter, ajustement de la capacité) à partir de demandes prévisionnelles et à moindre coût. Ces décisions sont intégrées, sous la forme de contraintes dites de conservation d'énergie, qui assurent l'interaction avec le niveau inférieur. Ce dernier ordonnance de façon agrégée les opérations de fabrication en respectant au mieux ces contraintes en localisant leur début et leur fin au cours d'une période de planification. L'interaction énergétique assure la transmission de données entre les deux niveaux. Le chapitre suivant présente la démarche méthodologique pour analyser la performance de cette approche intégrée pour la planification dynamique.

CHAPITRE IV.

ANALYSE DE PERFORMANCE : DEMARCHE METHODOLOGIQUE

IV.1. Introduction

Ce chapitre porte sur la méthodologie développée pour analyser la performance du modèle de planification dynamique d'une chaîne logistique.

Dans cette démarche, nous associons à chaque itération de planification k un CSP (P^k) correspondant au problème de planification à résoudre. Le problème (P^{k+1}) constitue une actualisation du problème (P^k) par l'ajout ou le retrait de certaines contraintes issues de perturbations internes ou externes (figure IV.1). Nous considérons trois types de perturbations : variation de la demande, variation de la capacité et re-planification de la demande.

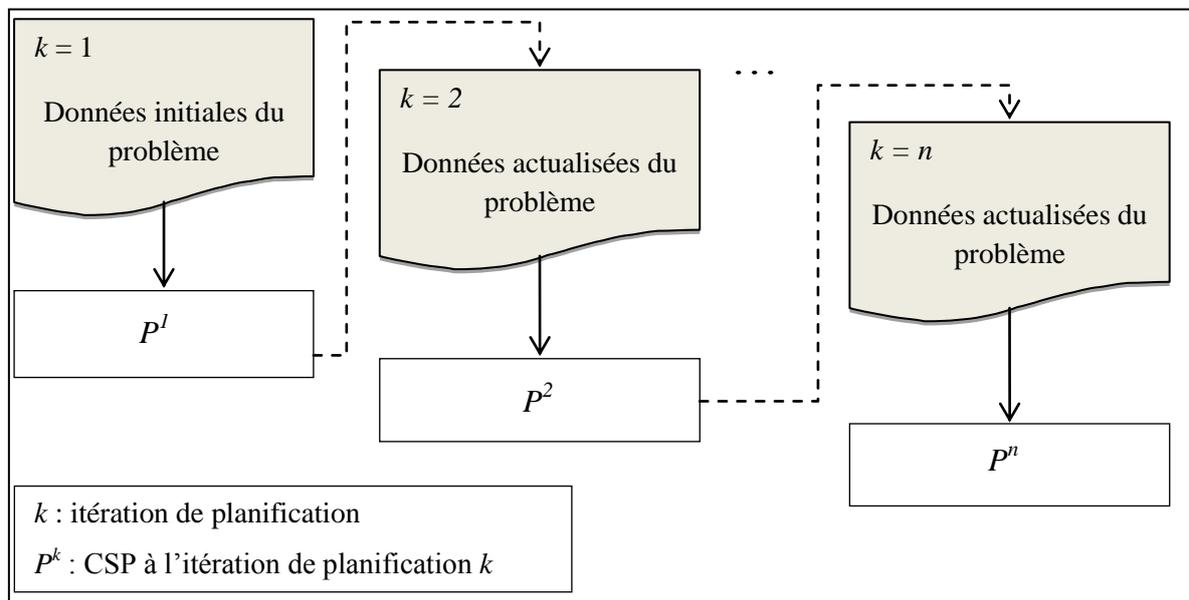


Figure IV.1. Schéma d'actualisation d'un problème de planification

Pour une actualisation donnée CSP (P^{k+1}), nous appliquons, séparément, deux méthodes de résolution différentes : une méthode de résolution statique et une méthode de résolution dynamique. Une solution constitue un plan de planification – ordonnancement agrégé. La performance d'une solution est renseignée par l'ensemble des mesures de la stabilité et de la robustesse aux niveaux sites et au niveau de la chaîne logistique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous exposons les objectifs de l'analyse et l'approche comparative. Nous présentons ensuite les techniques de résolution et les indicateurs de performance formalisés.

IV.2. Objectifs et Démarche

IV.2.1. Objectifs de l'analyse : Mesurer la stabilité et la robustesse

La performance d'une chaîne logistique est évaluée par l'ensemble des mesures de satisfaction des objectifs que se fixent les entreprises partenaires. Dans notre travail, les résultats numériques obtenus par différentes simulations sont comparés sur la base d'indicateurs de performance localement au niveau « Site ». Par la suite, ils sont déduits globalement au niveau « Chaîne logistique ». Ces mesures portent sur la quantification de la réorganisation induite par la modification d'un programme de production. Une solution est alors évaluée par la comparaison entre :

- les décisions engagées, correspondantes au déroulement réel et prévu des activités de transformation du flux physique, et
- les décisions du plan modifié, visant à réorganiser et à mettre à jour ces mêmes activités suite à un aléa.

Pour une solution donnée, les résultats traduisent l'étendue du changement tant sur les décisions de planification (quantités à produire) que sur les décisions d'ordonnancement agrégé (dates de début des opérations). Ces résultats sont à la base du référentiel de mesure de performances utilisé dans la suite de ce chapitre pour évaluer la stabilité et la robustesse d'une solution, notions que nous définissons ci-dessous.

- Définition de la Robustesse

La littérature scientifique nous permet de distinguer plusieurs définitions de la notion de « robustesse » issues de plusieurs disciplines. Toutefois, les différentes définitions présentent un élément commun en associant généralement la notion de « robustesse » à celle d'incertitude, de risque et de prise de décision [Kleijnen, 2003].

Dans le domaine des statistiques, la robustesse est définie comme « *une insensibilité à toutes déviations par rapport aux hypothèses* » [Huber, 1981]. En recherche opérationnelle, et selon la même vision, Bertsimas et Sim définissent une résolution robuste comme étant une approche insensible aux incertitudes sur les données du problème. Cette approche permet de générer une solution ayant une performance proche de celle de la solution optimale malgré les variations des valeurs des données incertaines [Bertsimas et Sim, 2004]. En gestion de

production, Zapfel [Zapfel, 1998] et Roy [Roy, 1998] utilisent une autre définition : « *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* ». Dans le même cadre, et dans le contexte d'approches hiérarchisées, Mercé et Fontan indiquent que « *une décision agrégée est dite robuste si elle assure l'existence d'au moins une décision détaillée* » [Mercé et Fontan, 2001], [Fontan *et al.*, 2005].

Parmi les différentes définitions, celle de Taguchi nous semble la plus adaptée à notre problématique: « *Un système est dit robuste s'il permet d'obtenir une faible dispersion des performances cibles malgré les variations des paramètres non contrôlables* ». Les paramètres non contrôlables sont considérés comme les sources de variations dans un problème de décision [Taguchi, 1987]. Dans cette même optique, Génin s'est appuyé sur la définition de Taguchi pour définir la robustesse d'un plan de production. Il propose la définition suivante : « *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* » [Génin, 2003].

Dans notre travail, la robustesse est approchée sous l'angle de l'aptitude d'une solution de planification/ordonnancement à assurer un niveau minimal de dispersion du programme de production initial face aux variations de certaines données (demande, capacité, etc.). Cette notion est employée pour quantifier la dispersion des valeurs modifiées par la variation d'une donnée, révélant ainsi la plus ou moins grande aptitude d'une solution à assurer la performance de robustesse.

- Définition de la Stabilité

[Durieux et Pierreval, 2003] indiquent que « *le terme stabilité est généralement mis en opposition à celui de nervosité* ». Stabilité et nervosité de la planification sont souvent traitées dans la littérature au niveau du calcul des besoins (MRP) [Yano et Carlson, 1987], [Ho, 1989], [Sridharan et Laforge, 1990], [Jensen, 1993], [Hei, 1998]. Calculer un programme directeur de production (PDP) revient à mettre en place un horizon glissant, ce qui implique de le recalculer avec une périodicité Δt ; par conséquent, ce type de pratique induit des variations dans les quantités de production résultantes. Selon [Herrera et Thomas, 2010], la stabilité (nervosité) d'un PDP est alors relative aux différences entre les quantités planifiées recalculées à chaque itération du processus. Celui-ci sera stable si celles-là sont peu

importantes et instable dans le cas contraire. Pour [Vollman *et al.*, 1997], « *la nervosité est communément définie comme des changements significatifs dans les plans MRP, qui ont lieu même en cas de changement minime du niveau supérieur ou du PDP. Les changements concernent les quantités ou les périodes des ordres planifiés* ». Il ressort que lorsque nous nous intéressons à la stabilité d'un système, nous cherchons à ne pas remettre en cause très souvent les décisions que nous aurions prises.

Dans notre travail, nous aborderons la notion de stabilité en tant qu'aptitude d'une solution de planification/ordonnancement à assurer un certain niveau de continuité du programme de production initial face aux variations de certaines données (demande, capacité, etc.). Cette notion est employée pour compter le nombre de variables modifiées par une variation d'une donnée, révélant ainsi la plus ou moins grande aptitude d'une solution à assurer la performance de stabilité.

IV.2.2. Approche comparative : CSP statique vs CSP dynamique

L'analyse que nous avons menée vise à mettre en exergue les avantages et inconvénients incombant à chaque type de résolution (CSP statique et CSP dynamique) pour faire face à des variabilités types elles-mêmes simulées. Plus précisément, il s'agit d'étudier le comportement global de chaque résolution sous l'angle de la stabilité et la robustesse face à trois types de variations :

- Variation de la demande client
- Variation de la capacité de production
- Variation de re-planification

Basée sur un cas d'étude, l'approche comparative a porté sur les résultats aux niveaux « Planification » et « Ordonnancement agrégé », ainsi qu'aux niveaux « Site » et « Chaîne logistique ». Dans tous les cas, ces mesures comparatives sont calculées sur un même horizon.

IV.3. Procédures de résolution : CSP Statique et CSP Dynamique

Nous associons à chaque itération de planification (k) et sur un horizon de planification HP , un CSP P^k . La résolution de chaque itération (k) est séparée de la résolution du CSP relatif à l'itération de planification ($k-1$). Les expérimentations sont effectuées à l'aide du

logiciel ECLⁱPS^e 6.0 qui est une extension du langage Prolog incluant des bibliothèques de programmation par contraintes.

Dans ce cadre, deux méthodes de résolution sont employées. Nous décrivons dans les paragraphes suivants, la méthode de résolution CSP statique et la méthode de résolution CSP dynamique.

IV.3.1. Procédure de résolution CSP statique

Le problème étudié est un problème d'optimisation où l'objectif est donc de déterminer une solution associée à la minimisation d'une fonction objectif. Pour cela, nous utilisons une procédure de type séparation et évaluation (*branch-and-bound*). Cette méthode est basée sur une recherche arborescente d'une solution optimale dans un ensemble combinatoire de solutions possibles. Elle implique trois éléments principaux [Lalami, 2012] :

- la séparation (*branch*) consiste à diviser un ensemble de solutions en sous-ensembles plus petits ;
- l'évaluation (*bound*) permet d'évaluer les solutions d'un sous-ensemble de façon optimiste en majorant la valeur de la meilleure solution de ce sous-ensemble, ce qui permet d'éliminer de l'espace de recherche les sous-ensembles de solutions qui ne peuvent pas fournir une solution optimale ;
- la stratégie de parcours permet de choisir le prochain sommet à séparer parmi l'ensemble des sommets de l'arborescence.

La bibliothèque *branch-and-bound* d'ECLⁱPS^e 6.0 fournit des prédicats génériques qui implémentent cette procédure et offre différentes stratégies de recherche :

- *Continue* : après avoir trouvé une solution, continuer la recherche avec la nouvelle borne imposée sur le coût.
- *Restart* : après avoir trouvé une solution, recommencer la recherche avec la nouvelle borne imposée sur le coût.
- *Dichotomic* : après avoir trouvé une solution, diviser l'espace de recherche en deux et recommencer la recherche pour trouver une solution dans la partie inférieure ; si cela échoue, revenir à la partie supérieure et diviser de nouveau.

Nous adoptons une stratégie de recherche du type *Continue*⁶. Etant donné que le problème considéré est à deux niveaux de décision (planification et ordonnancement agrégé), deux critères d'optimisation différents (C1 et C2) sont considérés. Ainsi, à partir d'une solution qui optimise le premier critère C1 (minimisation du coût total de production) au niveau planification⁷, nous recherchons une solution qui optimise le deuxième critère C2 (minimisation des en-cours) au niveau ordonnancement agrégé. Pour notre problème de planification, il s'agit de minimiser, respectivement, le coût au premier niveau de décision et les en-cours au deuxième niveau de décision.

La bibliothèque *ic* d'ECLⁱPS^e6.0 fournit également des prédicats génériques pour la recherche de solutions et offre différentes méthodes de recherche qui peuvent être classifiées en des méthodes de recherche complètes et des méthodes de recherche incomplètes. Les solutions fournies dans le cadre de ce travail et pour toutes les expérimentations réalisées ont été générées à partir d'une méthode de recherche incomplète dite *Credit search*. Cette méthode explore le haut de l'arbre de la recherche complètement. Initialement, un montant donné de crédit est fixé. A chaque nœud de l'arbre, la première alternative obtient la moitié du crédit disponible, la seconde alternative aura le crédit restant et ainsi de suite. Lorsque le crédit est épuisé, on passe à une deuxième méthode de recherche : *Bounded backtracking search* avec un nombre de backtracks égal à 5.

La variable est choisie selon l'heuristique *Most_constrained* (choix de la variable associée au plus petit ratio taille de domaine/nombre de contraintes dans lesquelles elle est impliquée). Concernant le choix des valeurs, nous faisons appel à la primitive *indomain_split*. Au premier appel, l'heuristique fixe la variable à la plus petite valeur dans son domaine. En cas de retour-arrière, elle essaie la valeur qui suit dans le domaine, etc. D'autres heuristiques et d'autres méthodes de recherche peuvent être sélectionnées et programmées.

⁶Formellement, la fonction optimisation est exprimée en ECLⁱPS^e 6.0 par le prédicat suivant : *bb_min(+Goal,?Cost,?Options)*. *bb-min* donne une seule solution de *Goal* qui minimise *Cost* avec une stratégie de recherche *Continue* comme *Options*.

⁷A titre d'exemple, pour le niveau planification, le prédicat suivant a été employé : *bb_min(search(L1,0,most_constrained,indomain_split,credit(100,bbs(5)),[]),Cost_Total,bb_options{strategy:continue})*, avec : *search(L1,0,most_constrained,indomain_split,credit(100,bbs(5)),[])*, le *Goal* et *Cost_Total* le *Cost*.

IV.3.2. Procédure de résolution CSP dynamique

Dans cette partie, nous décrivons la procédure de résolution dynamique. Dans ce cadre, nous adoptons l'approche par *réutilisation de solution*, décrite dans le deuxième chapitre de cette thèse, pour la résolution des DCSP. Ainsi, la résolution d'un CSP (P^k) ne part pas de zéro mais de la solution relative au CSP (P^{k-1}). Pour cela, nous utilisons les *techniques de réparation* et en particulier la technique de *recherche locale* dont le principe de base est le suivant :

- Trouver une instanciation initiale pour toutes les variables du problème (leur donner des valeurs tentatives) ;
- Trouver une contrainte en conflit (i.e. une contrainte qui ne satisfait pas les valeurs tentatives de ces variables), et instancier une variable de cette contrainte à sa nouvelle valeur (i.e. changer sa valeur tentative) ;
- Instancier les variables restantes à leurs valeurs tentatives, lorsqu'il n'y a plus de contraintes en conflit.

Dans notre travail, l'instanciation initiale des variables d'un problème (P^k) n'est autre que la solution du problème relative à l'itération de planification précédente (P^{k-1}). Aussi, les contraintes d'un problème (P^k) ne sont pas toutes mises en conflit. Si nous considérons que C_k est l'ensemble des contraintes et C_{conf} l'ensemble des contraintes en conflit, alors :

$$C_{conf} \subseteq C_k.$$

La bibliothèque *Repair* d'ECLiPS^e6.0 fournit des prédicats génériques qui implémentent la technique de recherche locale :

- *tent_set*, pour instancier une variable à sa valeur tentative ;
- *conflict_constraint* et *term_variables* retournent respectivement l'ensemble des contraintes qui sont en conflit et l'ensemble des variables de la contrainte en conflit ;
- *set_to_tent*, permet d'instancier les variables qui n'appartiennent pas à des contraintes en conflit à leur valeur tentative.

Etant donné que notre problème est un problème d'optimisation, nous combinons les techniques de recherche locale et les techniques de séparation et évaluation pour la recherche de la solution optimale. Le code suit le schéma de la [figure IV.2](#).

```

solve(Vars, Vars1) :-
    Vars = [X, K, G, Hsup, S],                                % variables du problème
    ...
    set_tentative(X, K, G, Hsup, S),
    ...
    bb_min(repair_ic(L1), Cost_Total, bb_options{strategy : continue}).

set_tentative(X, K, G, Hsup, S):-
    X tent_set Tx,
    ...
    S tent_set Ts.

repair_ic(L1): -
    conflict_constraints(cr, List),
    (List = [ ] ->
        set_to_tent(L1),
        ;
        List = [Constraint_] ->
        term_variables(Constraint, Vars),
        move(Vars),
        repair_ic(L1)
    ).

move([Var1|Vars):-
    get_max(Var1, Vmax),
    Var1 tent_get Value,
    (Value < Vmax ->
        NewValue is (Value+1),
        Var1 tent_set NewValue
    );
    move(Vars)
).

```

Figure IV.2. Algorithme de réparation

Ainsi, nous avons mis en œuvre cette procédure qui est basée sur deux grandes étapes :

- Instanciation de toutes les variables du problème à leur valeur tentative (*set_tentative(X, K, G, S, Hsup)*). Par exemple : la variable *X* est instanciée à sa valeur

tentative T_x ($X \text{ tent_set } T_x$), la variable S est instanciée à sa valeur tentative T_s ($S \text{ tent_set } T_s$), ...

- Recherche de solution à travers les techniques de réparation ($\text{repair_ic}(Vars)$).

La recherche de solution ($\text{repair_ic}(Vars)$) est basée sur les étapes suivantes :

- Pour cette instanciation initiale, on cherche, parmi les contraintes qui appartiennent à la liste cr , celles qui sont en conflit (contraintes non satisfaites). Pour ce faire, on utilise le prédicat : $r_conflict \ cr$. Il est à noter que cr est la liste des contraintes choisies pour la réparation (cr est un nom attribué à la liste).
- Vérifier si la liste cr est vide (aucune contrainte de la liste n'est violée) ou non. Deux cas se présentent :
 - a. Si oui (aucune contrainte en conflit), les variables seront affectées à leurs valeurs tentatives. Pour cela, le prédicat $set_to_tent(Vars)$ est employé ;
 - b. Sinon (la liste cr n'est pas vide, des contraintes en conflit existent)
 - i. une contrainte de la liste cr sera choisie. Pour cela, le prédicat ($List = [Constraint_]$) est employé ;
 - ii. toutes les variables de la contrainte en conflit qui a été sélectionnée sont regroupées dans la liste $Vars$ avec le prédicat $term_variables(Constraint, Vars)$. Une variable ($VarI$) de la liste $Vars$ sera modifiée ($move(Vars)$). Elle sera affectée à sa nouvelle valeur ($VarI \text{ tent_set } NewValue$). La nouvelle valeur est égale à l'ancienne valeur additionnée à 1 ($NewValue \text{ is } (Value+1)$). Cette démarche s'arrête lorsque la contrainte sera satisfaite ou que la variable sera affectée à la limite supérieure de son domaine de définition.
- La même procédure se répète jusqu'à l'obtention d'une solution ou d'un échec.

Contrairement à la résolution CSP Statique qui aborde la recherche sans aucun point de départ défini, cette procédure de résolution CSP dynamique commence la recherche à partir d'une solution initiale tentative et relative au CSP (P^{k-1}).

IV.4. Indicateurs de performance

IV.4.1. Protocole d'évaluation de la performance

La démarche générale est basée sur l'évaluation de la performance suite à deux itérations successives telles que : la première itération (k) correspond au problème initial et la deuxième itération ($k+1$) correspond au même problème avec prise en compte d'aléas. La solution initiale (relative au problème initial) que nous notons par α^k est obtenue par la méthode de résolution statique. La nouvelle solution (relative au problème avec prise en compte d'aléas) que nous notons par α^{k+1} est obtenue, distinctement et à des fins de comparaison, suivant les deux approches de résolution statique et dynamique.

L'approche comparative est menée en considérant différents types d'aléas exprimés sous forme de variation de la demande, de la capacité et de re-planification. Pour chaque type de variation, nous simulons différents taux (20% de modifications, 40% de modifications, ...).

Pour évaluer l'étendue de la perturbation possible sur les activités de production, nous comparons les deux nouvelles solutions obtenues, distinctement par résolution statique et par résolution dynamique, par rapport à la solution initiale. Ainsi, nous introduisons les deux types d'indicateurs P^N et P^E :

- P^N correspond à la **distance** de perturbation et permet de mesurer la **stabilité** de la solution ;
- P^E correspond au **poids** de perturbation et permet de mesurer la **robustesse** de la solution.

Ces deux indicateurs sont évalués au niveau planification et au niveau ordonnancement agrégé, ainsi qu'au niveau site de production et au niveau global de la chaîne logistique.

IV.4.2. Notions de Distance et de Poids de Perturbation

Pour rappel, un DCSP Θ est une suite P^0, P^1, \dots de CSP classiques, tels que deux problèmes successifs P^k et P^{k+1} ne diffèrent que par l'ajout ou le retrait de certaines contraintes.

Soit α^k une solution à P^k et α^{k+1} une solution à P^{k+1} . Nous définissons δ^1 comme l'ensemble de variables v tel que : l'instanciation h de v dans α^k est différente de l'instanciation h' de v dans α^{k+1} :

$$\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1}) :$$

Ainsi, la première fonction P^N est définie par le cardinal de l'ensemble. Elle correspond à la distance de perturbation, connue dans la littérature mathématique comme la *distance de Hamming* :

$$P^N(\alpha^{k+1}, \alpha^k) = |\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1})| \quad (2)$$

Nous définissons δ_v^2 comme la différence numérique entre l'instanciation de v dans α^k et l'instanciation de v dans α^{k+1} :

$$\delta_v^2(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = (h' - h) \forall v/h \in \alpha^k, v/h' \in \alpha^{k+1} \quad (3)$$

Ainsi, la deuxième fonction P^E est définie comme la somme des valeurs absolues δ_v^2 . Elle correspond au poids de perturbation :

$$P^E(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \sum_v |\delta_v^2| \quad (4)$$

Etant donné que notre approche intégrée comporte deux niveaux, le plan de production est caractérisé par :

- Des variables relatives à la planification des produits (premier niveau) comme le volume de production interne, le volume de production sous-traitée, les stocks, les arriérés, etc.
- Des variables relatives à l'ordonnancement agrégé (deuxième niveau) comme les dates de début, le nombre de ressources nécessaires, les durées de fabrication des différents produits.

Les indicateurs de performance que nous employons dans notre travail relèvent des deux niveaux énumérés ci-dessus et en particulier les volumes de production pour le niveau de planification et les dates de début des opérations pour le niveau d'ordonnancement agrégé.

IV.4.3. Indicateurs de performance au niveau Site de production

La gestion d'une chaîne logistique nécessite la disposition d'informations sur l'état courant des différents sites de production. Ainsi, la définition d'une solution de planification/ordonnancement retenue pour la chaîne logistique, et son évaluation sur le niveau local des sites de production constitue un moyen d'assurer un certain niveau de stabilité et de robustesse.

IV.4.3.1. Stabilité et robustesse de la planification

- Stabilité : Distance moyenne de perturbation

Pour le premier niveau de décision correspondant à la planification, la distance moyenne de perturbation (P_S^N) pour un site donné est calculée pour les variables ($X_{p,t,s}$) correspondant aux quantités des produits p lancés en production interne sur les différentes périodes t sur le site s . Elle est définie par la formule suivante :

$$P_S^N(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \frac{|\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1})|}{P_s * T} \quad (5)$$

avec :

$$\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \{X_{p,t,s} \in \Theta \mid X_{p,t,s}/h \in \alpha^k \ \& \ X_{p,t,s}/h' \in \alpha^{k+1} \ \& \ h \neq h'\}$$

P_s : nombre de produits traversant le site s

T : nombre de périodes

- Robustesse : Poids moyen de perturbation

Pour ce même niveau de planification, le poids moyen de perturbation (P_S^E) pour un site donné est calculé pour les variables ($X_{p,t,s}$). Il est défini par la formule suivante :

$$P_S^E(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \frac{\sum_v |\delta_v^2|}{P_s * T} \quad (6)$$

avec :

$$\delta_v^2(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = (h' - h) \forall X_{p,t,s}/h \in \alpha^k, X_{p,t,s}/h' \in \alpha^{k+1}$$

P_s : nombre de produits traversant le site s

T : nombre de périodes

IV.4.3.2. Stabilité et robustesse d'ordonnancement

- Stabilité : Distance moyenne de perturbation

Pour le deuxième niveau de décision correspondant à l'ordonnancement agrégé, la distance moyenne de perturbation (P_S^N) pour un site donné est calculée pour les variables ($Deb_{p,t,s}$) correspondant aux dates de début des opérations des produits p sur les différentes périodes t sur le site s . Elle est définie par la formule suivante :

$$P_S^N(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \frac{|\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1})|}{P_S * T} \quad (7)$$

avec :

$$\delta^1(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \{Deb_{p,t,s} \in \Theta \mid Deb_{p,t,s}/h \in \alpha^k \ \& \ Deb_{p,t,s}/h' \in \alpha^{k+1} \ \& \ h \neq h'\}$$

P_S : nombre de produits traversant le site s

T : nombre de périodes

- Robustesse : Poids moyen de perturbation

Pour ce même niveau d'ordonnancement, le poids moyen de perturbation (P_S^E) pour un site donné est calculé pour les variables ($Deb_{p,t,s}$). Il est défini par la formule suivante :

$$P_S^E(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = \frac{\sum_v |\delta_v^2|}{P_S * T} \quad (8)$$

avec :

$$\delta_v^2(\alpha^k, \alpha^{k+1}) = (h' - h) \forall Deb_{p,t,s}/h \in \alpha^k, Deb_{p,t,s}/h' \in \alpha^{k+1}$$

P_S : nombre de produits traversant le site s

T : nombre de périodes

IV.4.4. Indicateurs de performance au niveau chaîne logistique

L'évaluation de la performance est une problématique largement étudiée dans la littérature récente sur la chaîne logistique. Ici, notre objectif est d'évaluer une solution de planification/ordonnancement de l'ensemble de la chaîne. Ainsi nous mettons en place des « mesures de performance » pour évaluer la stabilité et la robustesse globale de la solution.

IV.4.4.1. Stabilité et robustesse de la planification

- Stabilité : Distance moyenne de perturbation

Pour le premier niveau de décision, correspondant à la planification, la distance moyenne de perturbation (P_{CL}^N) pour la chaîne logistique est la moyenne des distances moyennes de perturbation (P_S^N) sur tous les sites. Elle est définie par la formule suivante :

$$P_{CL}^N(X_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^N(X_{p,t,s}^k)}{S} \quad (9)$$

avec : S = nombre de sites de la chaîne logistique.

- Robustesse : Poids moyen de perturbation

Pour ce même niveau de planification, le poids moyen de perturbation (P_{CL}^E) pour la chaîne logistique est la moyenne des poids moyens de perturbation (P_S^E) sur tous les sites. Il est défini par la formule suivante :

$$P_{CL}^E(X_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^E(X_{p,t,s}^k)}{S} \quad (10)$$

avec : S = Nombre de sites de la chaîne logistique.

IV.4.4.2. Stabilité et robustesse de l'ordonnancement

- Stabilité : Distance moyenne de perturbation

Pour le deuxième niveau de décision, correspondant à l'ordonnancement, la distance moyenne de perturbation (P_{CL}^E) pour la chaîne logistique est la moyenne des distances moyenne de perturbation (P_S^N) sur tous les sites. Elle est définie par la formule suivante :

$$P_{CL}^N(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^N(Deb_{p,t,s}^k)}{S} \quad (11)$$

avec : S = nombre de sites de la chaîne logistique.

- Robustesse : Poids moyen de perturbation

Pour ce même niveau de planification, le poids moyen de perturbation (P_{CL}^E) pour la chaîne logistique est la moyenne des poids moyens de perturbation (P_S^E) sur tous les sites. Il est défini par la formule suivante :

$$P_{CL}^E(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^E(Deb_{p,t,s}^k)}{S} \quad (12)$$

avec : S = nombre de sites de la chaîne logistique.

Le [tableau IV.1](#) et le [tableau IV.2](#) présentent une récapitulation des différents types d'indicateurs utilisés pour les niveaux planification et ordonnancement agrégé aux niveaux sites de production et au niveau chaîne logistique respectivement.

	Indicateurs de performance au niveau Site de production	
	Stabilité : distance de perturbation	Robustesse : poids de perturbation
Planification (Niveau 1)	$P_S^N(X_{p,t,s}^k) = \frac{ \{X_{p,t,s}^{k+1} \neq X_{p,t,s}^k\} }{P_s * T}$	$P_S^E(X_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_p \sum_{t=1}^T X_{p,t,s}^{k+1} - X_{p,t,s}^k }{P_s * T}$
Ordonnancement (Niveau 2)	$P_S^N(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{ \{Deb_{p,t,s}^{k+1} \neq Deb_{p,t,s}^k\} }{P_s * T}$	$P_S^E(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_p \sum_{t=1}^T Deb_{p,t,s}^{k+1} - Deb_{p,t,s}^k }{P_s * T}$
<p><i>avec :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ P_s = Nombre de produits traversant le site s ✓ T = Nombre de périodes 		

Tableau IV.1. Tableau de synthèse des indicateurs de performance (niveau sites)

		Indicateurs de performance au niveau Chaîne logistique	
		Stabilité : distance de perturbation	Robustesse : poids de perturbation
Planification (Niveau 1)		$P_{CL}^N(X_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^N(X_{p,t,s}^k)}{S}$	$P_{CL}^E(X_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^E(X_{p,t,s}^k)}{S}$
		$P_{CL}^N(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^N(Deb_{p,t,s}^k)}{S}$	$P_{CL}^E(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^E(Deb_{p,t,s}^k)}{S}$
Ordonnancement (Niveau 2)		$P_{CL}^N(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^N(Deb_{p,t,s}^k)}{S}$	$P_{CL}^E(Deb_{p,t,s}^k) = \frac{\sum_s P_S^E(Deb_{p,t,s}^k)}{S}$
<p><u>avec</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ P_S = Nombre de produits traversant le site s ✓ T = Nombre de périodes 			

Tableau IV.2. Tableau de synthèse des indicateurs de performance (niveau chaîne logistique)

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté les objectifs et notre démarche méthodologique, nous avons, dans un premier temps, détaillé les deux procédures de résolution que nous avons adoptées : la procédure de résolution statique et la procédure de résolution dynamique. Dans un second temps, et dans le but de caractériser la performance de notre approche, nous avons élaboré un ensemble d'indicateurs de performance. Ces indicateurs ont été divisés en deux catégories. La première catégorie regroupe les indicateurs qui caractérisent le plan établi au niveau planification. La deuxième catégorie concerne les indicateurs qui caractérisent le plan établi au niveau ordonnancement agrégé. Pour les deux niveaux de décision, les indicateurs permettent de mesurer la stabilité et la robustesse de la solution.

Le chapitre suivant portera sur l'évaluation de notre approche par simulation dans un contexte caractérisé par des aléas. Toutes les expérimentations sont réalisées en suivant la

procédure CSP statique et la procédure CSP dynamique. Pour la première, les différents problèmes de planification relatifs à des itérations successives sont résolus séparément et la solution relative à une itération de planification k ne constitue pas une base pour la résolution à l'itération suivante ($k+1$). La deuxième procédure est basée sur la mémorisation et la réutilisation des solutions et en particulier la méthode de recherche locale.

CHAPITRE V.

EXPERIMENTATION NUMERIQUE ET EVALUATION DE L'APPROCHE

V.1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'analyse du modèle de planification dynamique et l'évaluation des deux approches de résolution CSP Statique /CSP Dynamique, et leurs impacts sur la conduite d'une chaîne logistique.

Face à un aléa, un plan de production solution génère, pour chacun des sites, les volumes de production pour le niveau de planification et les dates de début des opérations pour le niveau d'ordonnancement agrégé.

Une solution est évaluée par sa performance à assurer un certain niveau de stabilité (mesure de la distance de perturbation P^N) et de robustesse (mesure du poids de perturbation P^E). Les expérimentations sont réalisées aux niveaux sites de production et au niveau global de la chaîne logistique.

Le cadre est un cas d'étude de réseau de sites de production. Le problème de nature académique est choisi de complexité réduite pour éviter une inutile explosion des données et une difficulté d'analyse des résultats d'expérimentation.

V.2. Présentation du cas d'étude

V.2.1. Description de la structure et des données de la chaîne logistique

La chaîne logistique se compose de plusieurs sites de production appartenant à une même entreprise, et réalisant différents types de produits. La réalisation d'un produit nécessite une succession d'opérations de fabrication, réalisée chacune sur un site donné. Il s'agit d'organiser la production de 5 produits finis (A , B , C , D et E), sur un horizon de planification de 18 périodes. Les délais d'obtention ainsi que les coûts unitaires associés aux décisions de production (interne, sous-traitée ou heures supplémentaires) sont indiqués dans le [tableau V.1](#).

Type de décision	Délai d'obtention		Coût unitaire	
Production interne (<i>LP</i>)	<i>A</i>	1	<i>A</i>	4
	<i>B</i>	1	<i>B</i>	4
	<i>C</i>	1	<i>C</i>	4
	<i>D</i>	1	<i>D</i>	4
	<i>E</i>	1	<i>E</i>	4
Sous-traitance (<i>LS</i>)	<i>A</i>	2	<i>A</i>	10
	<i>B</i>	2	<i>B</i>	10
	<i>C</i>	2	<i>C</i>	10
	<i>D</i>	2	<i>D</i>	10
	<i>E</i>	2	<i>E</i>	10
Heures supplémentaires	1		12	

Tableau V.1. Délais et coûts de production des produits

Le [tableau V.2](#) représente les coûts unitaires de stockage et de rupture de chaque produit.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Coût unitaire de stockage	8	8	8	8	8
Coût unitaire de rupture	20	20	20	20	20

Tableau V.2. Coûts unitaires de stockage et de rupture

Le profil de la demande prévisionnelle relatif à la première itération de planification est présenté dans le [tableau V.3](#).

Demande	<i>t=1</i>	<i>t=2</i>	<i>t=3</i>	<i>t=4</i>	<i>t=5</i>	<i>t=6</i>	<i>t=7</i>	<i>t=8</i>	<i>t=9</i>	<i>t=10</i>	<i>t=11</i>	<i>t=12</i>	<i>t=13</i>	<i>t=14</i>	<i>t=15</i>	<i>t=16</i>	<i>t=17</i>	<i>t=18</i>
	<i>A</i>	50	55	42	90	62	43	49	50	68	95	86	50	90	62	43	43	49
<i>B</i>	60	42	68	85	73	56	50	60	48	55	63	51	72	68	53	59	50	52
<i>C</i>	72	60	55	43	92	33	35	75	50	68	59	60	35	75	50	71	60	32
<i>D</i>	65	55	60	68	59	50	52	40	80	63	82	43	42	90	62	48	35	63
<i>E</i>	30	30	48	35	63	71	60	32	65	75	53	56	59	50	52	42	90	62

Tableau V.3. Profil de la demande (première itération de planification : $k = 1$)

Les capacités des éléments de production sont définies ci-dessous :

- $C_{t,s}=240$: la capacité de production interne pour chaque site de production est de 240 ut ;
- $Hmax_s=30$: un contingent maximum de 30 heures supplémentaires peut être affecté pour chaque site de production ;

- $ST_{p,t,s} = 50$: le volume de production maximal du produit p en sous-traitance en période t sur le site de production s est de 50 produits ;
- $h_{p,s} = 1$: la fabrication d'une unité de produit p en interne sur chaque site s nécessite une unité de temps.

Les 5 produits seront réalisés sur les différents sites de production (5 sites) selon les gammes indiquées sur la [figure V.1](#).

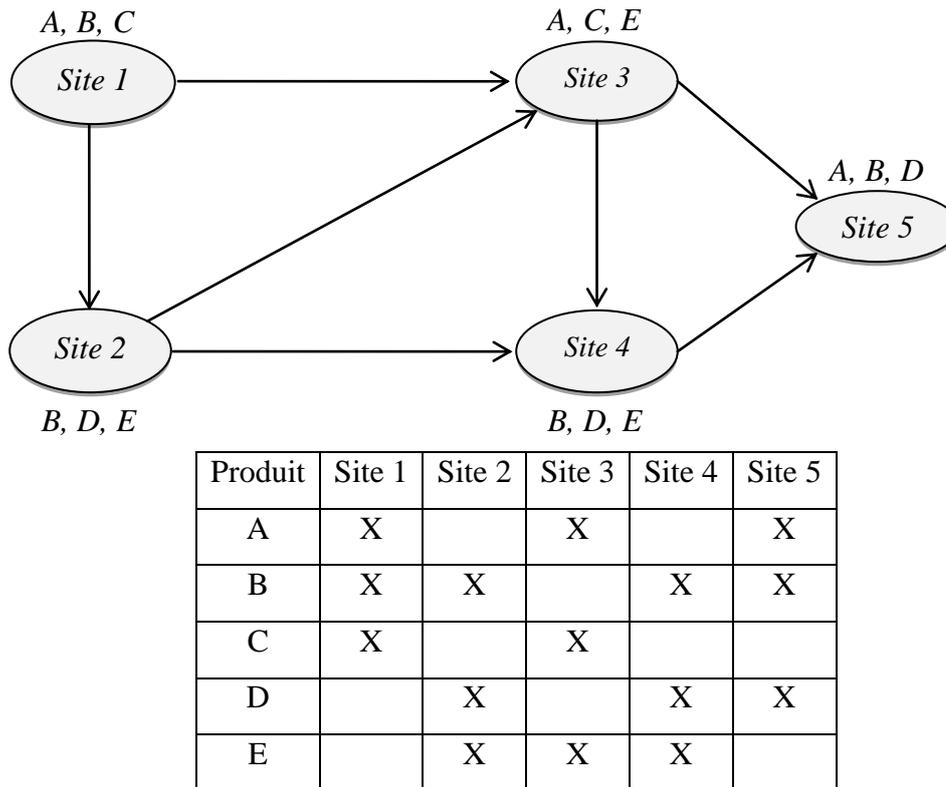


Figure V.1. Gamme de fabrication des différents produits

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5
Capacité	5	4	5	3	5

Tableau V.4. Capacité des sites de production

Chaque site est défini par sa capacité de production (en nombre de machines). Dans un souci de simplification, nous considérons que les différents sites utilisent des machines parallèles ([tableau V.4](#)).

V.2.2.Problématique et scénarios considérés

La chaîne logistique considérée s'inscrit dans le cadre d'un réseau de sites au sein duquel il existe un service logistique central assurant la planification et l'ordonnancement agrégé des charges de fabrication. Il s'agit de répartir et de coordonner les productions entre les sites tout en laissant à chaque site une autonomie au niveau de l'ordonnancement détaillé local. La description définie précédemment limite la complexité du problème sans pour autant restreindre le champ d'étude. Ainsi, différents phénomènes pratiques peuvent être explorés sur la base de ce cas d'étude.

En effet, après avoir planifié la production sur les sites et engagé leur organisation sur un horizon donné, le service logistique central peut se retrouver, à une période t , face à :

- une annulation imprévue d'une commande client pour un ou plusieurs produits ;
- une chute de la capacité de production sur un ou plusieurs sites suite à des pannes machines ou grèves d'employés ;
- un retard d'approvisionnements nécessaires à la production d'un ou plusieurs produits engendrant une re-planification de ces quantités à la période suivante $t+1$.

Pour ces différents scénarios, le service logistique central sera amené à réorganiser la solution initiale avec le minimum de perturbation de la production engagée sur les différents sites et du planning annoncé aux différents intervenants.

Dans ce cadre, nous menons trois séries d'expérimentations différentes qui correspondent respectivement à :

- (1) une variation de la demande ;
- (2) une variation de la capacité ;
- (3) une variation de re-planification à $t+1$.

L'objectif est d'évaluer et de comparer la stabilité et la robustesse fournies par la résolution CSP statique et la résolution CSP dynamique face au même type et à la même taille d'une variation simulée.

V.3. Évaluation de la stabilité et robustesse au niveau Site de production

V.3.1. Expérimentation avec une variation de la demande

V.3.1.1. Scénario d'expérimentation

Pour une période donnée ($t = 13$), la variation porte sur une chute de la demande. Cette simulation porte progressivement et cumulativement sur le produit 1, puis produit 2 jusqu'au produit 4. Sur chacun des produits la variation de la demande est d'une quantité égale à (-10). Le taux de variation est égal au nombre de produits variés sur le nombre total de produits.

- Taux de variation 20% : P1 de 90 à 80
- Taux de variation 40% : P1 de 90 à 80, et P2 de 72 à 62
- Taux de variation 60% : P1 de 90 à 80, et P2 de 72 à 62, et P3 de 35 à 25
- Taux de variation 80% : P1 de 90 à 80, et P2 de 72 à 62, et P3 de 35 à 25, et P4 de 42 à 32

Pour toutes ces mesures de variations, le taux de variation est considéré comme un scénario donné et non pas une grandeur de la variation. L'objectif est d'évaluer la performance suivant un axe de variation (figure V.2).

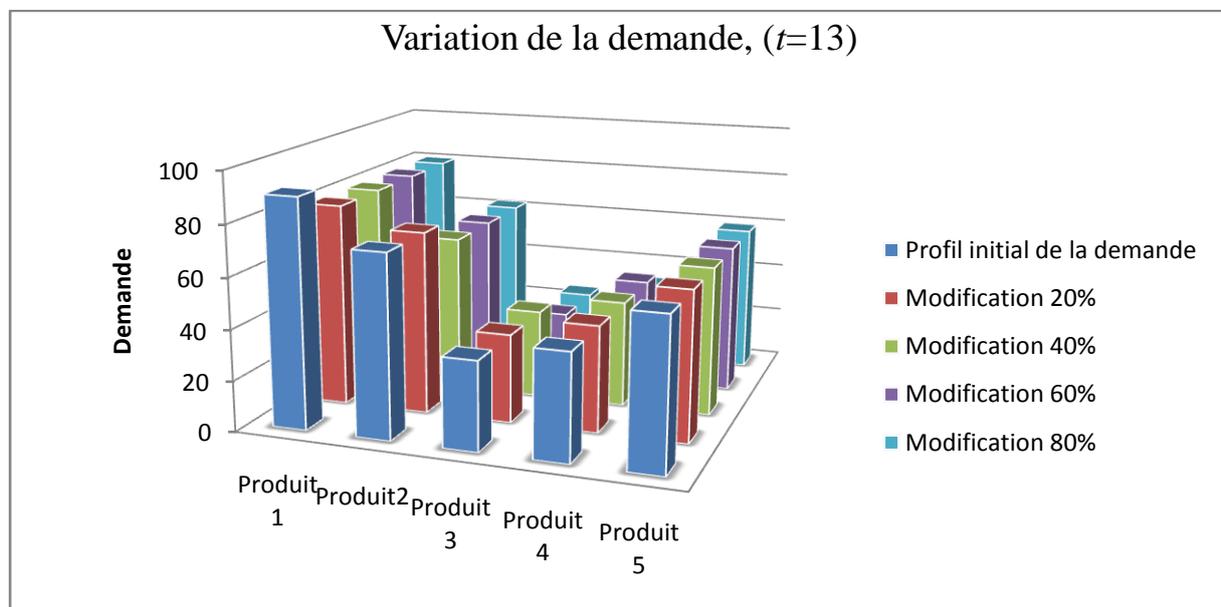


Figure V.2. Variation de la demande

V.3.1.2. Résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous présentons une vue détaillée des résultats obtenus avec la première famille d'expérimentations (variation de la demande). Nous présentons les résultats dans le cadre d'une résolution statique et d'une résolution dynamique. Les [tableaux V.5 et V.6](#) détaillent respectivement les résultats pour le niveau planification et le niveau ordonnancement agrégé.

Planification de la production : Premier niveau de décision																									
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E					Indicateur de stabilité : P_S^N					Indicateur de stabilité : P_S^N							
Variation de la demande	Variation (%)	Résolution statique					Chaîne logistique	Résolution dynamique					Chaîne logistique	Résolution statique					Chaîne logistique	Résolution dynamique					Chaîne logistique
		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	23.0	22.7	25.5	22.7	22.4	23.3	0.19	0	0.19	0	0.19	0.11	0.44	0.43	0.44	0.43	0.39	0.43	0.02	0	0.02	0	0.02	0.01
	40%	23.2	26.5	25.5	24.7	22.2	24.4	0	0	0	0	0	0	0.44	0.02	0.44	0.43	0.39	0.34	0	0	0	0	0	0
	60%	23.4	22.9	25.7	22.9	22.2	23.4	0	0	0	0	0	0	0.44	0.43	0.44	0.43	0.39	0.43	0	0	0	0	0	0
80%	23.4	30.1	25.8	30.1	37.2	29.3	0	0	0	0	0	0	0.44	0.44	0.44	0.44	0.41	0.43	0	0	0	0	0	0	

Tableau V.5. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la demande : premier niveau de décision

Ordonnancement agrégé de la production : Deuxième niveau de décision																									
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E					Indicateur de stabilité : P_S^N					Indicateur de stabilité : P_S^N							
Variation de la demande	Variation (%)	Résolution statique					Chaîne logistique	Résolution dynamique					Chaîne logistique	Résolution statique					Chaîne logistique	Résolution dynamique					Chaîne logistique
		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	0	32.8	72.1	196.8	255.8	111.5	0	0.1	1.11	7.31	8.85	3.47	0	0.22	0.74	1.24	1.24	0.68	0	0	0.04	0.09	0.1	0.04
	40%	0.3	20.2	61.6	151	180	82.62	0	0	0.74	6.57	8.11	3.08	0.02	0.19	0.46	0.8	0.8	0.41	0	0	0.02	0.07	0.1	0.038
	60%	0	19.9	50.8	134	169	74.74	0	0	0.74	6.57	8.11	3.08	0	0.17	0.5	0.76	0.8	0.44	0	0	0.02	0.07	0.1	0.038
80%	0	19.9	50.8	133	166	73.94	0	0	0.74	6.57	8.11	3.08	0	0.15	0.46	0.76	0.8	0.43	0	0	0.02	0.07	0.1	0.038	

Tableau V.6. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la demande : deuxième niveau de décision

	Indicateur de robustesse : poids de perturbation	Indicateur de stabilité : distance de perturbation
Planification de la production : premier niveau de décision (variation de la demande)	<p>Site 1</p>	<p>Site 1</p>
	<p>Site 2</p>	<p>Site 2</p>
	<p>Site 3</p>	<p>Site 3</p>
	<p>Site 4</p>	<p>Site 4</p>
	<p>Site 5</p>	<p>Site 5</p>

Tableau V.7. Variation de la demande : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production)

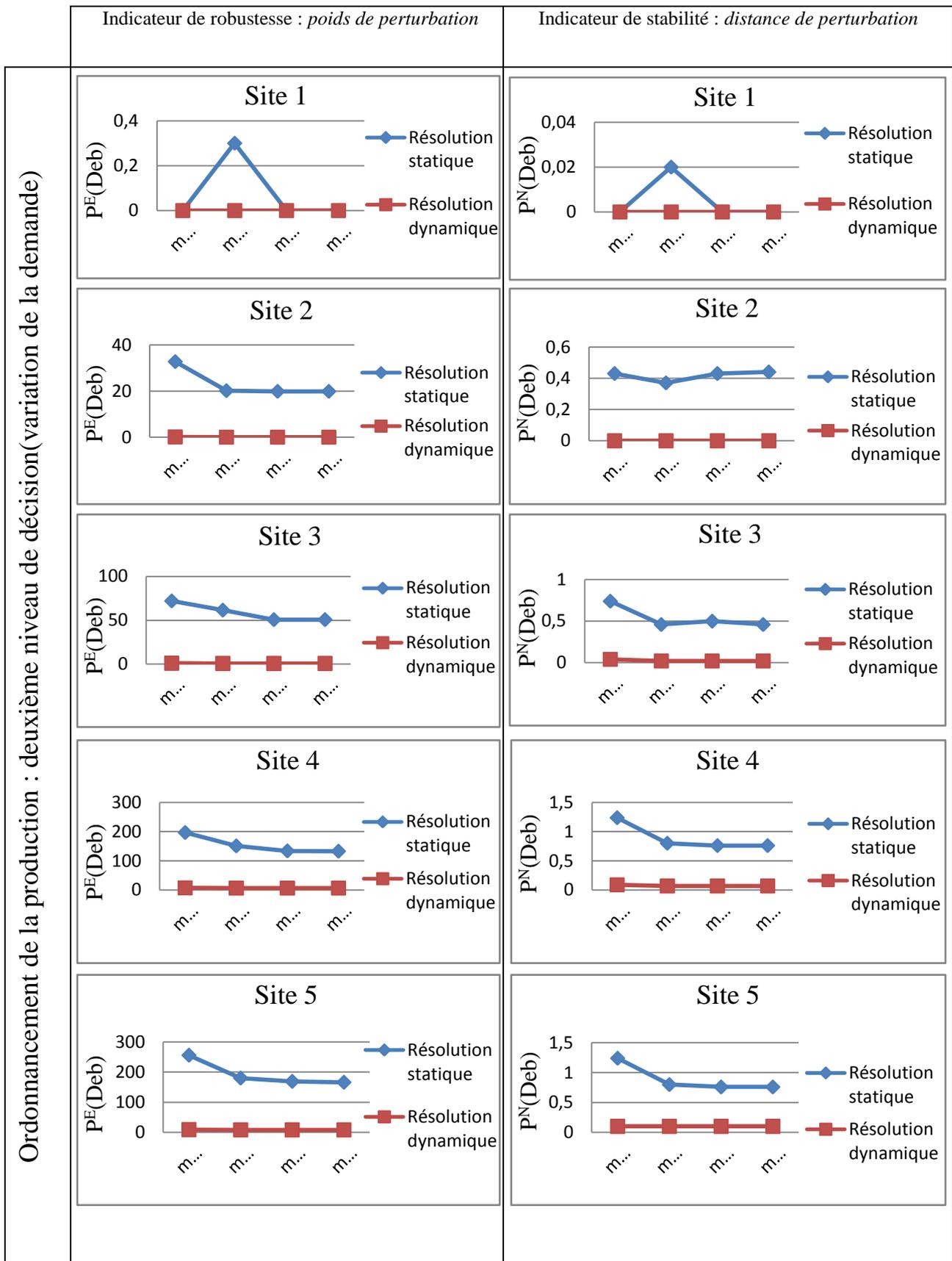


Tableau V.8. Variation de la demande : Evaluation de la perturbation au niveau sites

(ordonnancement agrégé)

V.3.1.3. Analyse des résultats

Pour le niveau planification ([tableau V.7](#)), nous établissons les constatations suivantes :

1. Pour la résolution statique et pour chaque site de production, les deux indicateurs de performance (stabilité P^N et robustesse P^E) évoluent dans le même sens. En effet, le poids de perturbation et la distance de perturbation évoluent en croissance avec l'évolution du taux de variation.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance tendent vers zéro indépendamment du taux de variation.
3. Avec la méthode de résolution statique, nous constatons que le poids de perturbation varie entre 22 et 37 pour tous les sites de production et la distance de perturbation varie entre 0.39 et 0.44. Il n'y a pas de grande différence entre les valeurs des indicateurs de performance d'un site à un autre.
4. Pour un même taux de variation, les deux indicateurs de performance évoluent indépendamment en se déplaçant d'un site à un autre et cela est vrai pour la résolution statique et pour la résolution dynamique.

Les mêmes conclusions sont constatées au niveau ordonnancement ([tableau V.8](#)) :

1. Pour la résolution statique, le poids de perturbation et la distance de perturbation évoluent dans le même sens mais, à la différence de la planification, l'évolution est indépendante du taux de variation.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance tendent vers zéro indépendamment du taux de variation.
3. Une augmentation des valeurs des deux indicateurs de performance est remarquable en se déplaçant d'un site à un autre pour la résolution statique et la résolution dynamique.

V.3.1.4. Interprétation des résultats

1. Dans le cadre de cette expérimentation, nous constatons que quel que soit le niveau de décision (planification ou ordonnancement agrégé) et pour tous les sites de production, les indicateurs de performance tendent vers zéro avec la résolution dynamique. Cette tendance peut être expliquée par la variation que nous avons simulée et que nous jugeons petite. En effet, une modification de 20% signifie qu'à une période donnée, nous considérons une chute de la demande d'une quantité égale à 10. Cependant, cette

même petite variation a entraîné une grande perturbation avec la résolution statique. Nous pouvons alors constater que la méthode de résolution dynamique est plus performante que la méthode de résolution statique.

2. Pour le niveau ordonnancement agrégé, nous remarquons une augmentation des valeurs des indicateurs de performance (P^N et P^E) lorsqu'on se déplace du site 1 vers le site 5, pour la résolution statique comme pour la résolution dynamique (tableau V.8). Cela peut être expliqué par le fait que le passage des produits sur les sites se fait toujours dans le même sens (du site 1 vers le site 5, [figure V.1](#)). Et par la suite, les dates de début des opérations en sites en amont sont toujours inférieures aux dates de début des opérations sur les sites en aval, avec un effet d'accumulation des facteurs perturbateurs.

V.3.2. Expérimentation avec une variation de la capacité

V.3.2.1. Scénario d'expérimentation

La deuxième série d'expérimentations porte sur une variation de la capacité des sites de production. Pour la période $t = 13$, cette simulation porte progressivement et cumulativement sur le site 1, puis site 2 jusqu'au site 4. Sur chacun des sites, la variation de la capacité est d'une quantité égale à (-1). Le taux de variation est égal au nombre de sites variés sur le nombre total de sites.

- Taux de variation 20% : S1 de 5 à 4
- Taux de variation 40% : S1 de 5 à 4, et S2 de 4 à 3
- Taux de variation 60% : S1 de 5 à 4, et S2 de 4 à 3, et S3 de 4 à 3
- Taux de variation 80% : S1 de 5 à 4, et S2 de 4 à 3, et S3 de 4 à 3, et S4 de 3 à 2

Pour toutes ces mesures de variations, le taux de variation est considéré comme un scénario donné et non pas une grandeur de la variation. L'objectif est d'évaluer la performance suivant un axe de variation ([figure V.3](#)).

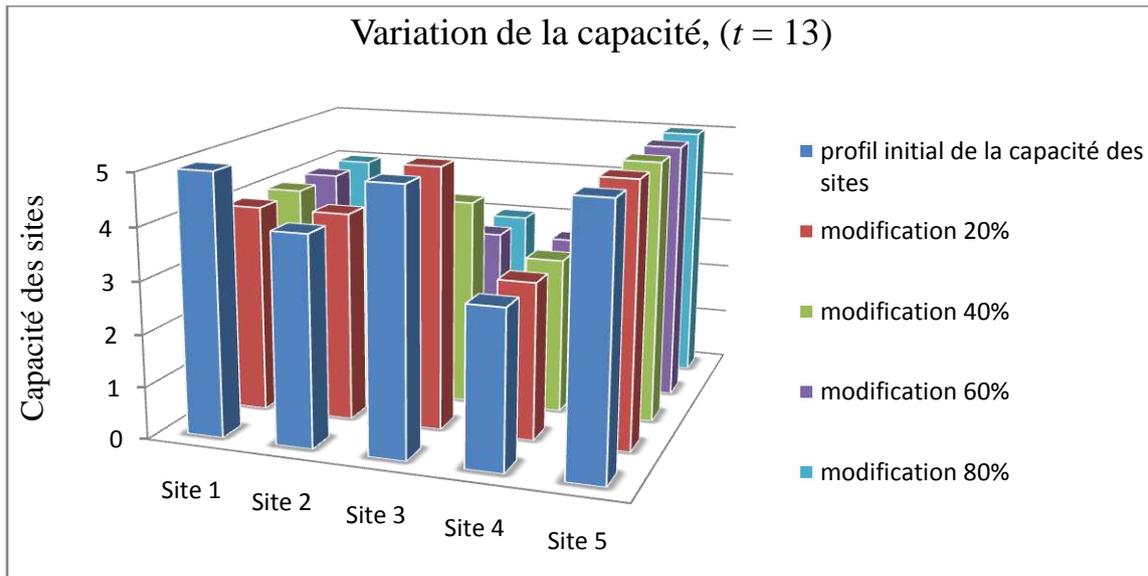


Figure V.3. Variation de la capacité à la période $t = 13$

Dans ce paragraphe, nous présentons une vue détaillée des résultats obtenus avec la deuxième famille d'expérimentations (variation de la capacité). Nous présentons les résultats dans le cadre d'une résolution statique et d'une résolution dynamique. Les tableaux V.9 et V.10 détaillent respectivement les résultats pour le niveau planification et le niveau ordonnancement agrégé.

		Planification de la production : Premier niveau de décision																							
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de stabilité : P_S^N						Indicateur de stabilité : P_S^N					
Variation de la capacité		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	24.3	26.3	25.7	25.4	22.2	24.8	0	0	0	0	0	0	0.43	0.37	0.44	0.41	0.39	0.41	0	0	0	0	0	0
	40%	24.3	28.1	25.8	25.4	22.3	25.1	0	0	0	0	0	0	0.43	0.46	0.44	0.41	0.39	0.43	0	0	0	0	0	0
	60%	24.3	28.1	31.4	25.4	26.5	27.1	0	0	0	0	0	0	0.43	0.46	0.5	0.41	0.46	0.45	0	0	0	0	0	0
	80%	24.3	28.1	28.4	16.9	22.2	24.0	0	0	0	0	0	0	0.43	0.46	0.44	0.33	0.39	0.41	0	0	0	0	0	0

Tableau V.9. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la capacité : premier niveau de décision

		Ordonnancement agrégé de la production : Deuxième niveau de décision																							
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de stabilité : P_S^N						Indicateur de stabilité : P_S^N					
Variation de la capacité		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	0	20.8	72.6	163	195.8	90.44	0	4.78	6.91	33.6	35.1	16.0	0	0,19	0,54	0,94	1	0.53	0	0,06	0,11	0,26	0,3	0.14
	40%	1.02	18.4	58	143	172	78.48	2.59	0	5.37	35.9	37.2	16.2	0,02	0,15	0,5	0,89	0,9	0.49	0,02	0	0,07	0,26	0,3	0.13
	60%	1.02	18.4	58	143	174	78.88	3.33	5.11	4.93	14.7	16.3	8.87	0,02	0,15	0,5	0,87	0,9	0.48	0,04	0,02	0,09	0,13	0,1	0.07
	80%	0	20.4	57	140	163	76.08	3.33	5.11	4.93	14.7	16.3	8.87	0	0,15	0,5	0,89	0,9	0.48	0,04	0,02	0,09	0,13	0,1	0.07

Tableau V.10. Résultats numériques dans le cas d'une variation de la capacité : deuxième niveau de décision

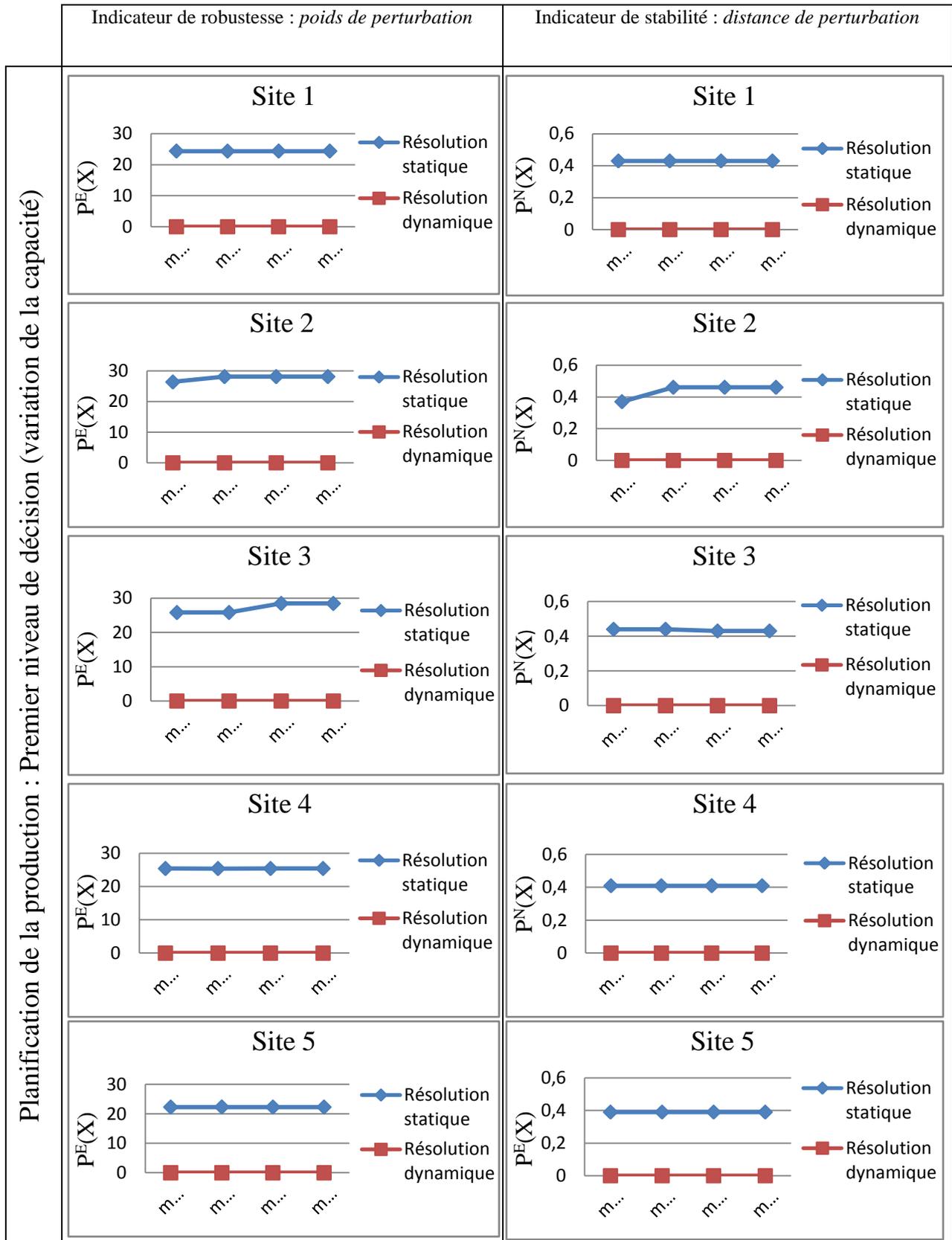


Tableau V.11. Variation de la capacité : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production)

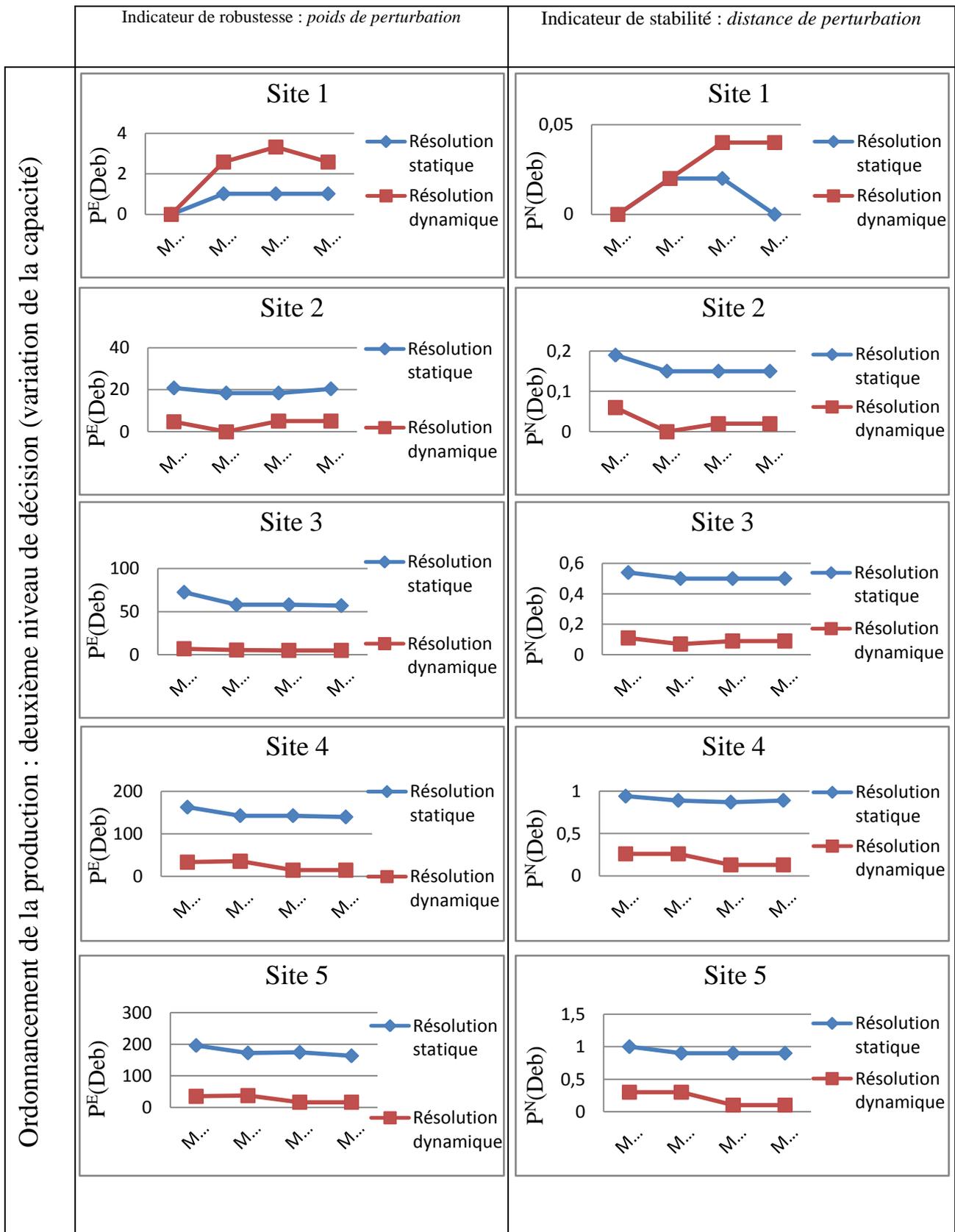


Tableau V.12. Variation de la capacité : Evaluation de la perturbation au niveau sites (ordonnancement agrégé)

V.3.2.2. Analyse des résultats

Nous retrouvons des éléments similaires par rapport à l'expérimentation précédente. Pour le premier niveau de décision (tableau V.11), nous notons que :

1. Pour la résolution statique, sur chaque site de production, les deux indicateurs de performance (stabilité P^N et robustesse P^E) sont en quasi-constance compte tenu de l'évolution du taux de la variation.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance tendent vers zéro indépendamment du taux de la variation.
3. Avec la résolution statique, nous constatons que la robustesse P^E varie entre 22 et 28.5 pour tous les sites de production et la stabilité P^N varie entre 0.39 et 0.47. Il n'y a pas de grande différence entre les valeurs des indicateurs de performance d'un site à un autre.
4. Pour un même taux de variation, les deux indicateurs de performance évoluent indépendamment en se déplaçant d'un site à un autre et cela est vrai pour la résolution statique et pour la résolution dynamique.

De même, pour le deuxième niveau de décision (tableau V.12), nous pouvons constater que :

1. Pour la résolution statique, le poids de perturbation et la distance de perturbation évoluent dans le même sens ; une évolution principalement en décroissance pour les sites 2, 3, 4 et 5. Le site 1 cependant présente une allure particulière, les deux indicateurs de performance évoluant indépendamment du taux de variation.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance évoluent aussi dans le même sens mais indépendamment du taux de variation. Le site 1 présente aussi une allure particulière : il évolue en croissance avec le taux de variation.
3. Pour un même taux de perturbation, les valeurs des deux indicateurs de performance évoluent d'une façon remarquable en se déplaçant d'un site à un autre et cette constatation est vraie pour la méthode de résolution statique et la méthode de résolution dynamique.

V.3.2.3. *Interprétation des résultats*

1. Dans le cadre de cette expérimentation, nous constatons que quel que soit le niveau de décision (planification ou ordonnancement agrégé), la méthode de résolution dynamique affiche une meilleure performance. Cependant, au niveau ordonnancement, une exception est levée pour le site 1 où la résolution statique donne de meilleures performances (stabilité et robustesse) par rapport à la résolution dynamique. L'écart entre les deux résolutions reste néanmoins faible.
2. Pour le niveau ordonnancement agrégé, nous remarquons une augmentation des valeurs des indicateurs de performance (P^N et P^E) lorsqu'on se déplace du site 1 vers le site 5, pour la résolution statique comme pour la résolution dynamique (tableau V.12). Comme nous l'avons expliqué précédemment dans le cas d'une variation de la demande, cette augmentation est due au fait que le passage des produits sur les sites se fait toujours dans le même sens (du site 1 vers le site 5, figure V.1), avec un effet d'accumulation des facteurs perturbateurs.

V.3.3. Expérimentation avec une variation de re-planification

V.3.3.1. *Scénario d'expérimentation*

Le troisième type de variation porte sur une re-planification de la demande telle que : pour une période donnée t , la variation porte sur une re-planification d'un produit en période $t+1$. L'exemple du tableau ci-dessous montre une re-planification du produit A en période $t+1$ et par la suite, la demande passe de 90 à 0 pour la période t et de 62 à (62+90) pour la période $t+1$.

	p	t	$t+1$	$t+2$
Demande	A	86	50	90	0	62 + 90	43

Tableau V.13.Exemple de variation de re-planification

Ainsi, pour la période $t = 13$, cette simulation porte progressivement et cumulativement sur le produit 1, puis produit 2 jusqu'au produit 4. Sur chacun des sites la variation de re-planification est d'une période égale ($t+1 = 14$). Le taux de variation est égal au nombre de produits variés sur le nombre total de produits.

La variation de re-planification en période $t=13$ et en période $t=14$ pour tous les produits sont présentés respectivement dans la [figure V.4](#) et la [figure V.5](#). Pour toutes ces mesures de variations, le taux de variation est considéré comme un scénario donné et non pas une grandeur de la variation. L'objectif est d'évaluer la performance suivant un axe de variation.

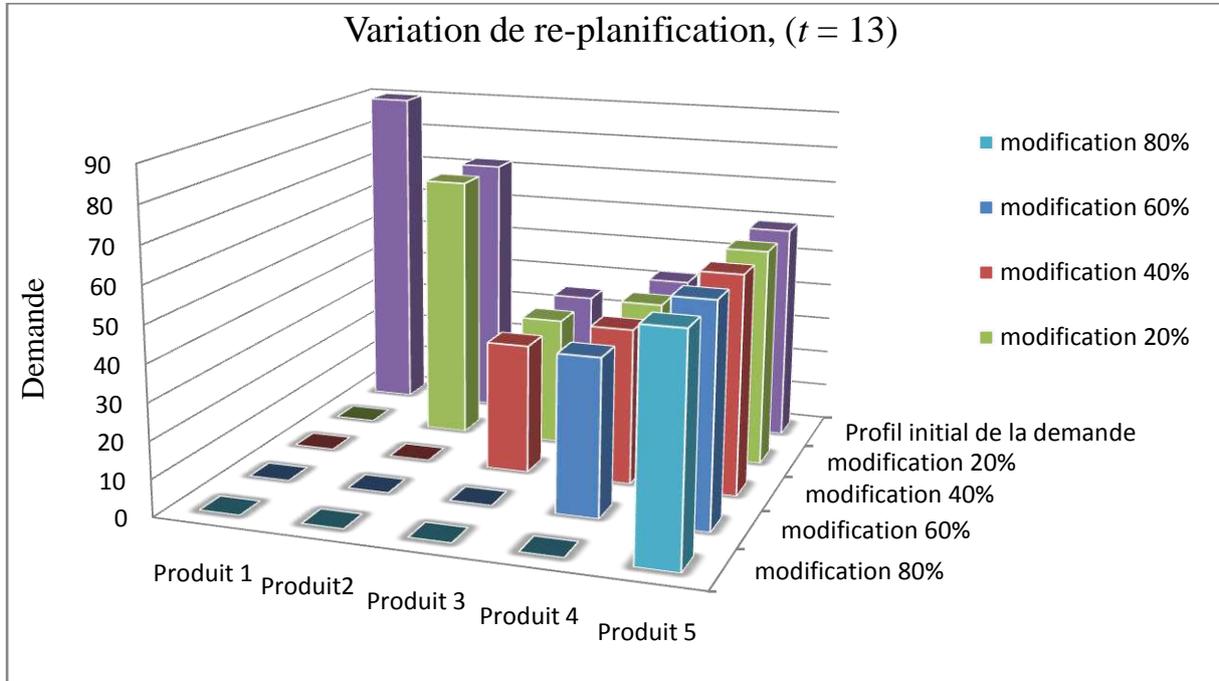


Figure V.4. Variation de re-planification en période $t = 13$

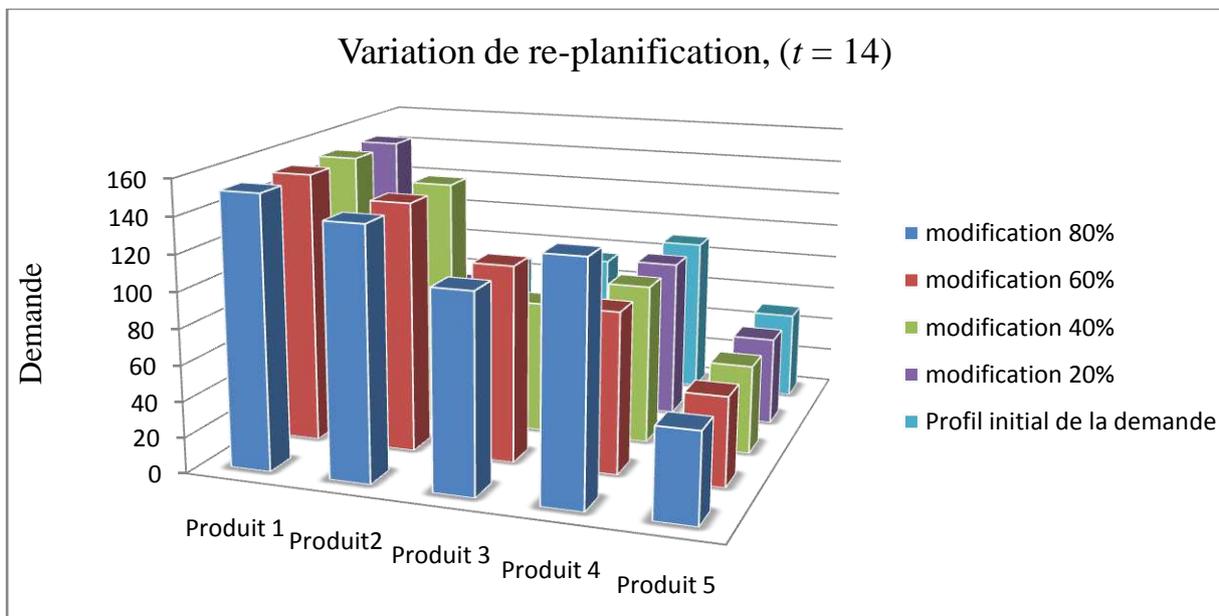


Figure V.5. Variation de re-planification en période $t = 14$

Dans ce paragraphe, nous présentons une vue détaillée des résultats obtenus avec la deuxième famille d'expérimentations (variation de re-planification). Nous présentons les résultats dans le cadre d'une résolution statique et d'une résolution dynamique. Les tableaux [V.14](#) et [V.15](#) détaillent respectivement les résultats pour le niveau planification et le niveau ordonnancement.

Planification de la production : Premier niveau de décision																									
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de stabilité : P_S^N						Indicateur de stabilité : P_S^N					
Variation de la-re- planification		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	20.0	26.3	22.5	24.9	25.5	23.9	0	0	0	0	0	0	0.43	0.37	0.43	0.43	0.39	0.41	0	0	0	0	0	0
	40%	22.7	29.0	22.5	24.9	25.6	24.9	0	0	0	0	0	0	0.43	0.37	0.43	0.43	0.39	0.41	0	0	0	0	0	0
	60%	31.3	29.0	23.8	24.9	25.6	26.9	0	0	0	0	0	0	0.43	0.37	0.43	0.43	0.39	0.41	0	0	0	0	0	0
	80%	31.3	23.4	23.8	16.3	24.0	23.8	0	0	0	0	0	0	0.43	0.41	0.43	0.33	0.37	0.39	0	0	0	0	0	0

Tableau V.14. Résultats numériques dans le cas d'une variation de re-planification : niveau planification

Ordonnancement agrégé de la production : Deuxième niveau de décision																									
Scénario		Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de robustesse : P_S^E						Indicateur de stabilité : P_S^N						Indicateur de stabilité : P_S^N					
Variation de la-re- planification		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	
	20%	1,41	20,5	63,3	150	179	82.84	0	11,4	4,09	30,8	32,4	15.7	0,02	0,17	0,48	0,8	0,8	0,45	0	0,06	0,04	0,17	0,2	0.094
	40%	1,41	23,2	61,9	160	188,4	86.98	0	0	0,74	6,57	8,11	3.08	0,04	0,26	0,61	0,87	0,9	0,5	0	0	0,02	0,07	0,1	0.038
	60%	0,3	22,1	67,7	163	192,1	89.04	0	0	0,74	6,57	8,11	3.08	0,02	0,2	0,48	0,78	0,8	0,45	0	0	0	0,04	0,1	0.028
	80%	0,3	23,9	56,8	149	174	80.8	0	0	0,74	6,57	8,11	3.08	0,02	0,2	0,57	1	1	0,55	0	0	0,02	0,07	0,1	0.038

Tableau V.15. Résultats numériques dans le cas d'une variation de re-planification : niveau ordonnancement agrégé

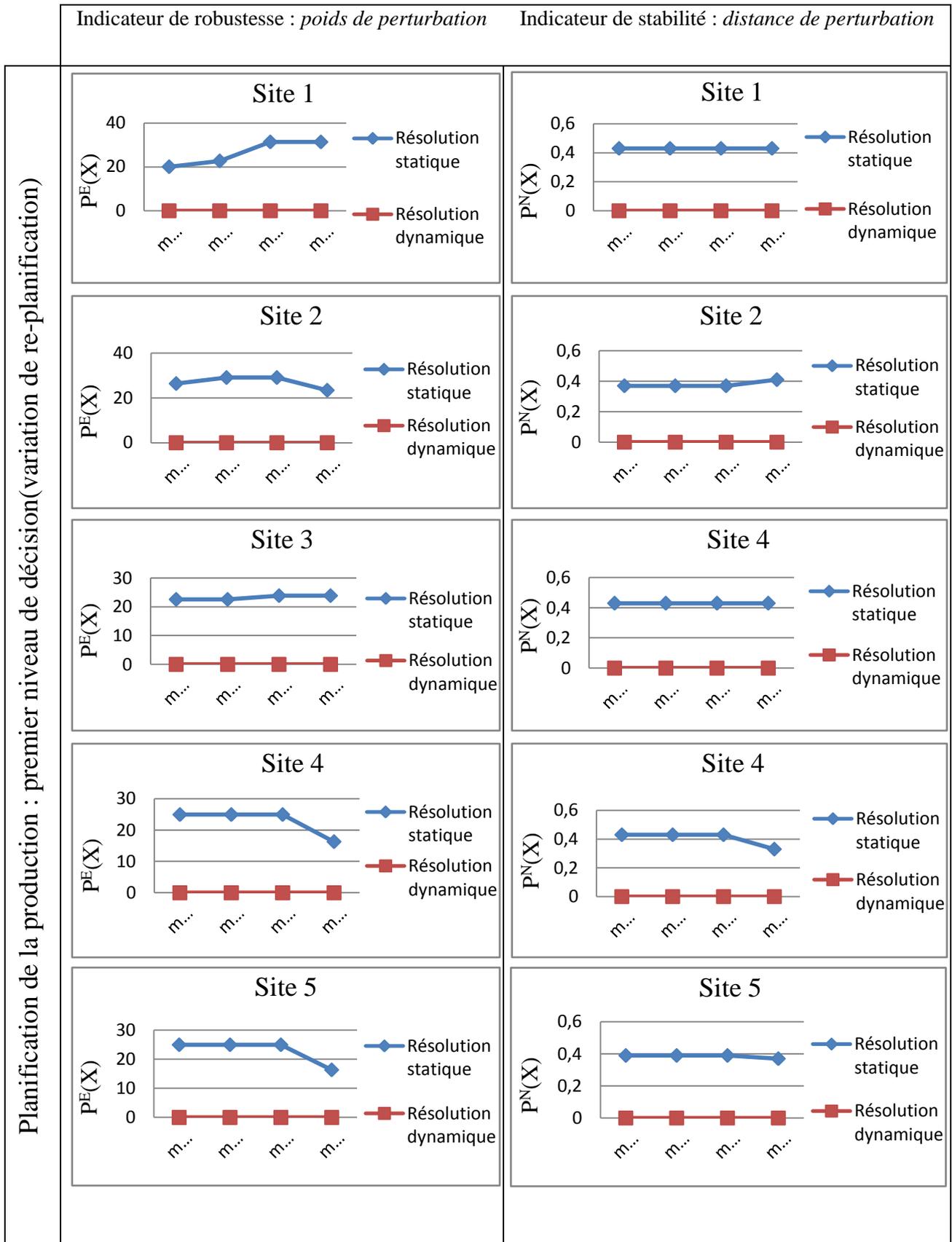


Tableau V.16. Variation de re-planification : Evaluation de la perturbation au niveau sites (planification de la production)

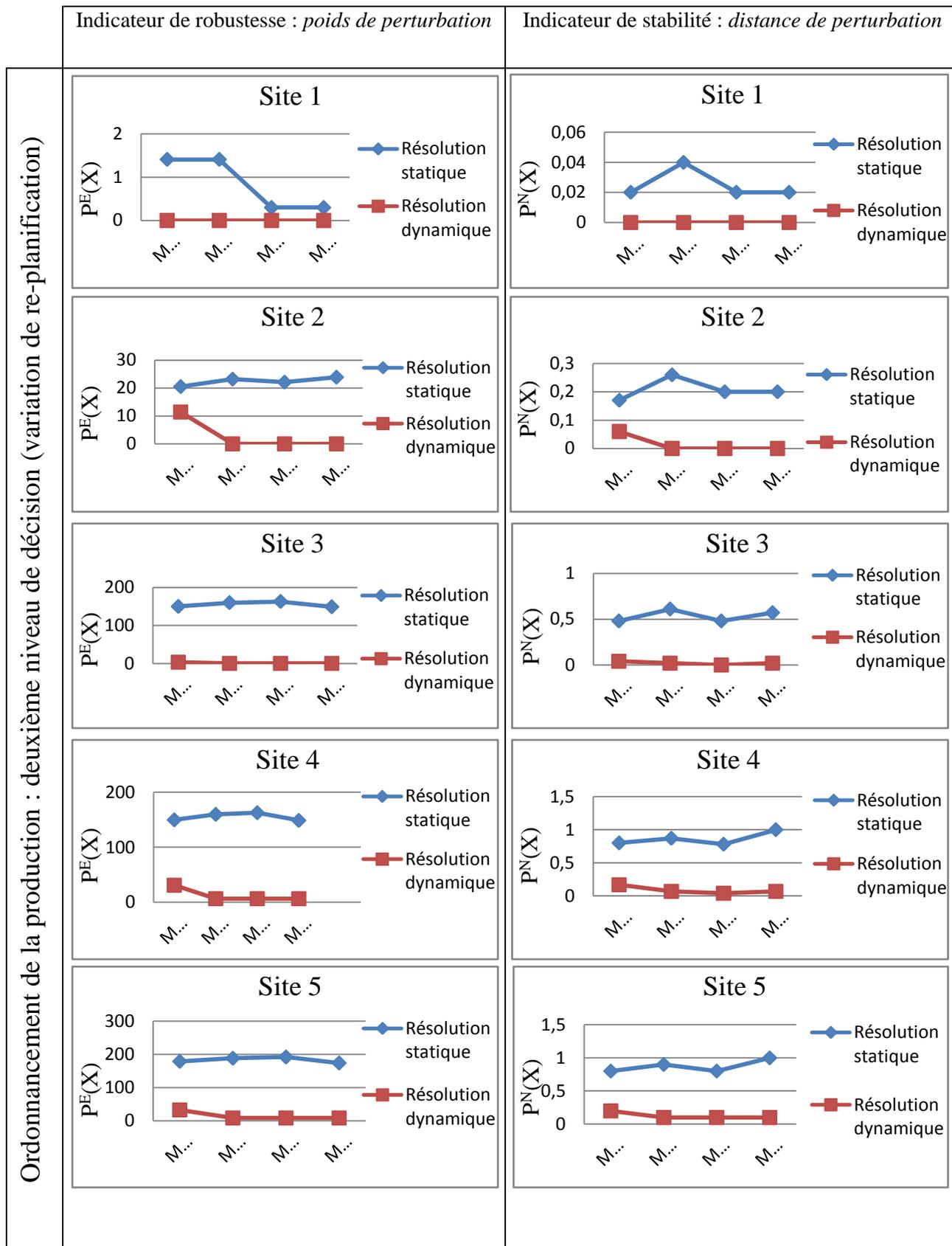


Tableau V.17. Variation de re-planification : Evaluation de la perturbation au niveau sites (ordonnancement agrégé)

V.3.3.2. Analyse des résultats

Pour le premier niveau de décision (tableau V.16), nous constatons que :

1. Pour la résolution statique, sur chaque site de production, le poids de perturbation et la distance de perturbation n'évoluent pas dans le même sens et l'évolution est indépendante du taux de variation.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance tendent vers zéro indépendamment du taux de variation.
3. Avec la méthode de résolution statique, nous constatons que le poids de perturbation varie entre 16 et 30 et la distance de perturbation varie entre 0.33 et 0.43 pour tous les sites de production. L'écart entre les valeurs des indicateurs de performance d'un site à un autre reste modeste.

Pour le deuxième niveau de décision (tableau V.17), nous constatons que :

1. Pour la résolution statique, et comme pour le niveau planification, les indicateurs de performance n'évoluent pas dans le même sens.
2. Pour la résolution dynamique, les indicateurs de performance évoluent dans le même sens (plutôt en décroissance).
3. Pour les deux méthodes de résolution, et pour chaque taux de perturbation, les valeurs des indicateurs de performance évoluent en croissance en passant d'un site à un autre.

V.3.3.3. Interprétation des résultats

1. Pour ce type de variation (variation de re-planification), nous pouvons constater que pour le niveau planification et le niveau ordonnancement, les deux indicateurs de performance n'évoluent pas dans le même sens avec la méthode de résolution statique. En effet, ce type de variation agit dans deux sens différents, il entraîne une annulation de la demande à une période ($t=13$) et une augmentation de la demande à la période suivante ($t=14$) et l'augmentation n'évolue ni en croissance ni en décroissance en fonction du taux de variation. Par exemple, une variation de la demande entraîne toujours une chute de la demande d'une valeur égale à 10 (d'un seul produit pour un taux de variation égal à 20% et de 4 produits pour un taux de variation égal à 80%). La variation de re-planification n'est pas donc constante en fonction du taux de la variation : une variation de 20% peut être plus

importante qu'une variation de 80%. Les comportements différents des indicateurs de performance peuvent alors s'expliquer par une variation de re-planification variable.

2. Bien que la perturbation soit assez importante si on la compare aux deux autres types de variation (variation de la demande et variation de la capacité), la résolution dynamique est bien meilleure que la méthode de résolution statique et cela pour les deux niveaux de décision (planification et ordonnancement).

Conclusion :

En examinant les résultats pour tous les types de variation, nous établissons les conclusions suivantes :

1. Pour les niveaux planification et ordonnancement agrégé, et pour les trois types de variations considérées, la résolution dynamique offre une stabilité et une robustesse meilleure que la résolution statique. Ceci conforte donc l'utilisation de la résolution dynamique.
2. Pour le niveau planification et avec la résolution dynamique, les indicateurs de performance tendent presque toujours vers zéro et ceci pour les trois séries d'expérimentations. Ceci peut s'expliquer par la stratégie de résolution que nous avons adoptée. En effet, l'idée était de partir de la solution précédente pour la réparation du problème ayant subi des perturbations. Pour cela, nous avons choisi de réparer les contraintes en conflit en augmentant progressivement les valeurs des variables ($X_{p,t,s}^k$) d'une valeur égale à 1. Par la suite, la solution est très proche de la solution initiale. Afin de satisfaire ces objectifs de stabilité et robustesse, la résolution tolère la régulation sur d'autres variables. Par exemple, si nous considérons le cas de la variation de la demande avec un taux de variation égal à 20%, la demande en produit 1 sur la période ($t= 13$), est passé de 90 à 80 et la solution obtenue par une résolution dynamique montre que la régulation a porté sur la quantité en stock ($I_{p,t,s}^k$). Cependant, la résolution dynamique reste toujours meilleure que la résolution statique même pour la variable (I) comme le montre la figure suivante (figure V.6).

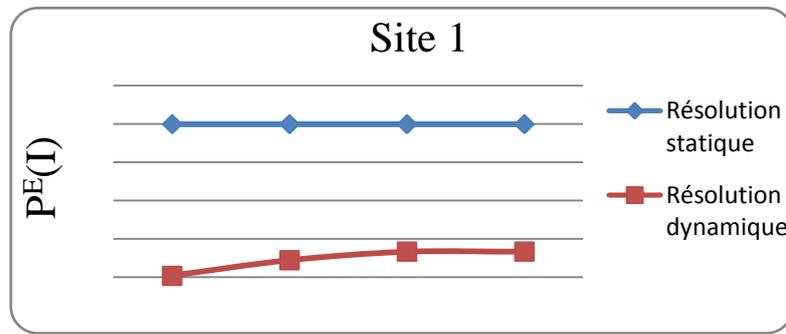


Figure V.6. Poids de perturbation pour la variable I (Site 1) avec une variation de la demande

3. L'influence du taux de variation sur l'évolution des indicateurs de performance est différente suivant le type de la variation. Nous pouvons noter que les indicateurs de performance évoluent en croissance dans le cas de la variation de la demande et que le taux de variation n'a pas d'influence sur les deux autres types de variation.

V.4. Analyse de sensibilité de la chaîne logistique : Résolution statique vs. dynamique

Jusqu'à présent le travail s'est intéressé à l'évaluation de deux indicateurs de performance au niveau des sites de production. Le premier est un indicateur de stabilité. Il a permis de compter le nombre de variables ayant changé dans la nouvelle solution par rapport à la solution initiale. Les mesures ont été réalisées au niveau de chaque site de production pour chacune des grandeurs (X pour le niveau planification et Deb pour le niveau ordonnancement). Le deuxième est un indicateur de robustesse. Il a permis de mesurer la dispersion de la nouvelle valeur par rapport à sa valeur initiale et cela pour chaque site de production. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'analyse de sensibilité de toute la chaîne logistique à travers une formulation globale de la stabilité et de la robustesse (formules présentées au chapitre IV, paragraphe IV.4.4).

En recherche opérationnelle, l'analyse de sensibilité consiste à déterminer si une solution est sensible à des modifications qui peuvent être apportées aux principaux paramètres du modèle. [Kelton, 1999] propose une définition similaire dans un contexte plus général dans la mesure où, pour lui, l'analyse de sensibilité est « une méthode qui permet d'estimer comment une modification d'un des facteurs d'entrée d'un système peut affecter la performance de celui-ci, c'est-à-dire quelle est la sensibilité d'une des sorties du système à la variation d'une entrée ».

Ainsi, notre analyse de sensibilité porte notamment sur la détection des variations pour lesquelles il est important d'investir et de travailler sur leur réduction car elles ont un impact non négligeable sur la stabilité et la robustesse de la chaîne logistique.

V.4.1. Sensibilité de la chaîne logistique face aux variations : niveau planification

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons particulièrement aux résultats relatifs au niveau planification.

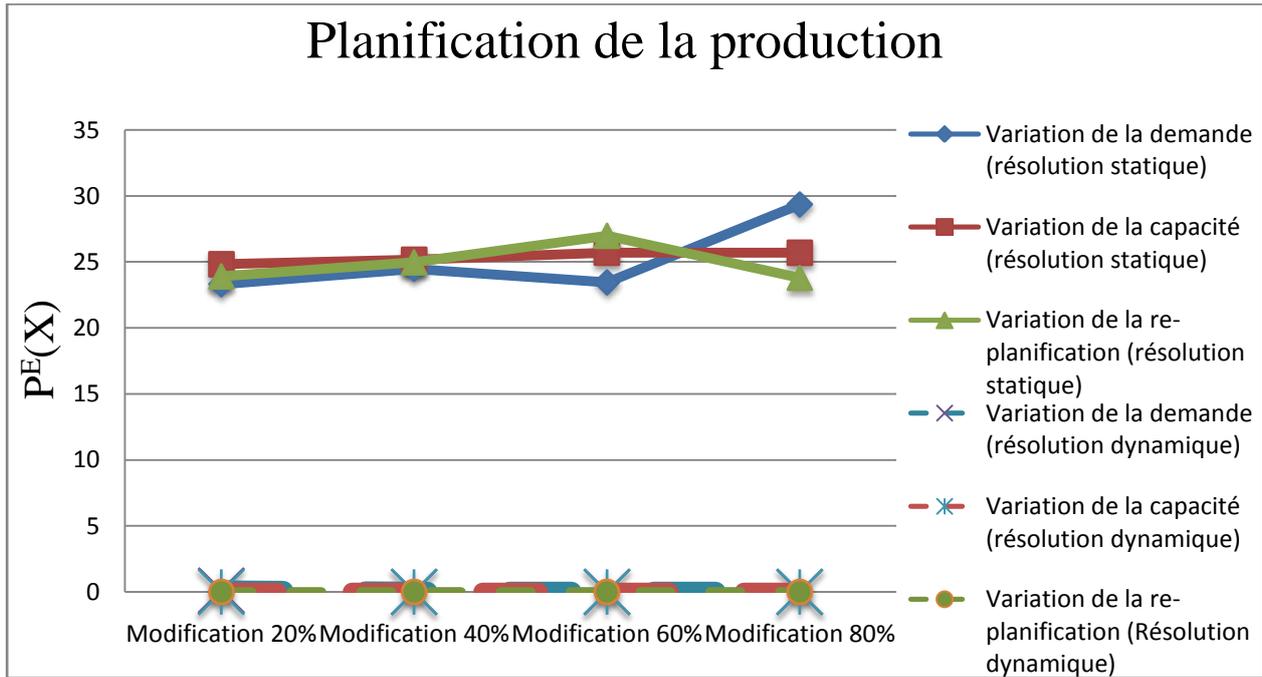


Figure V.7. Evaluation de la robustesse au niveau chaîne logistique pour les 3 types de variation

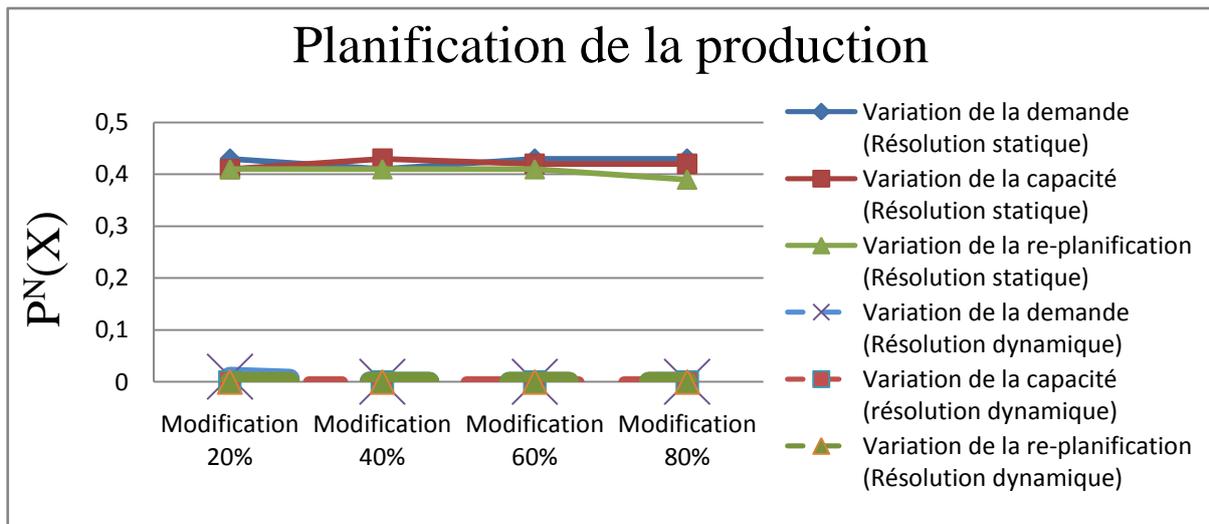


Figure V.8. Evaluation de la stabilité au niveau chaîne logistique pour les 3 types de variation

En présence d'une variation, indépendamment de son type, la résolution statique offre une solution de planification ayant relativement le même niveau de distance (P_{CL}^N) (figure V.7) et de poids de perturbation (P_{CL}^E) (figure V.8) de la chaîne logistique.

Cette perturbation garde pratiquement le même niveau avec la croissance du taux de modification (de 20% à 80%). Pour les variations de type demande, capacité et re-planification, la résolution dynamique offre une planification stable ($P_{CL}^N \approx 0$) et robuste ($P_{CL}^E \approx 0$) de la chaîne logistique.

V.4.2. Sensibilité de la chaîne logistique face aux variations : niveau ordonnancement

Nous nous intéressons dans ce paragraphe à l'évaluation de la performance de la chaîne logistique pour différents types de variation au niveau ordonnancement agrégé.

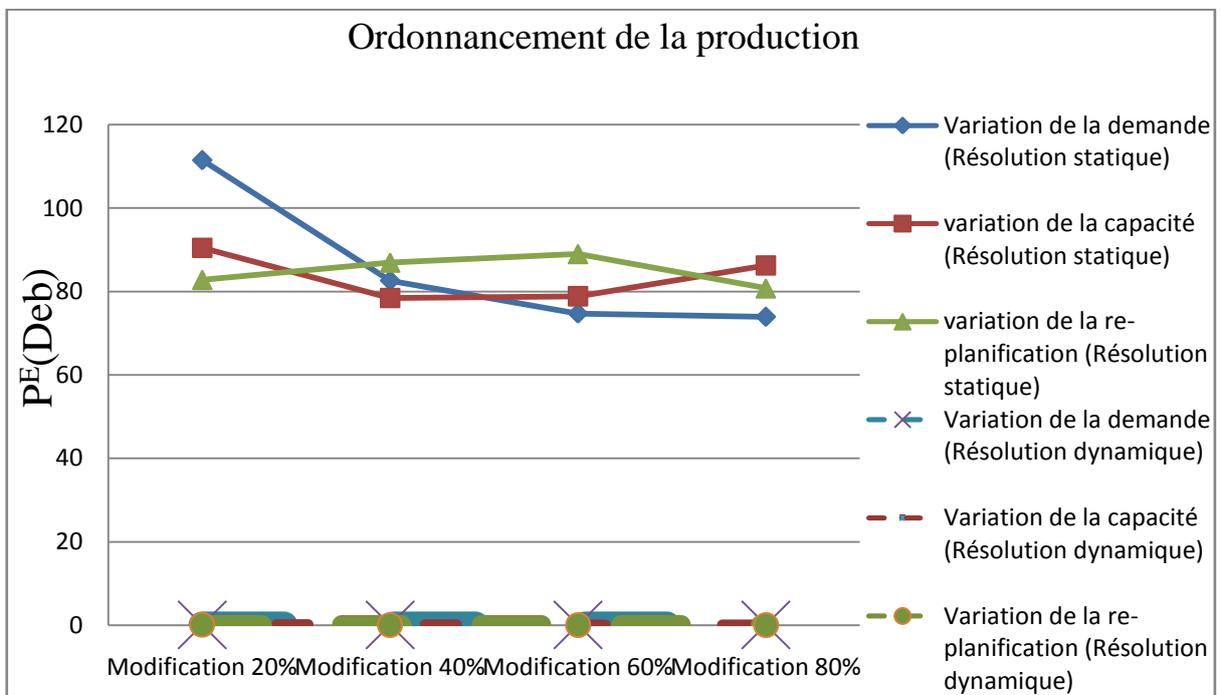


Figure V.9. Evaluation de la robustesse au niveau ordonnancement pour les 3 types de variation

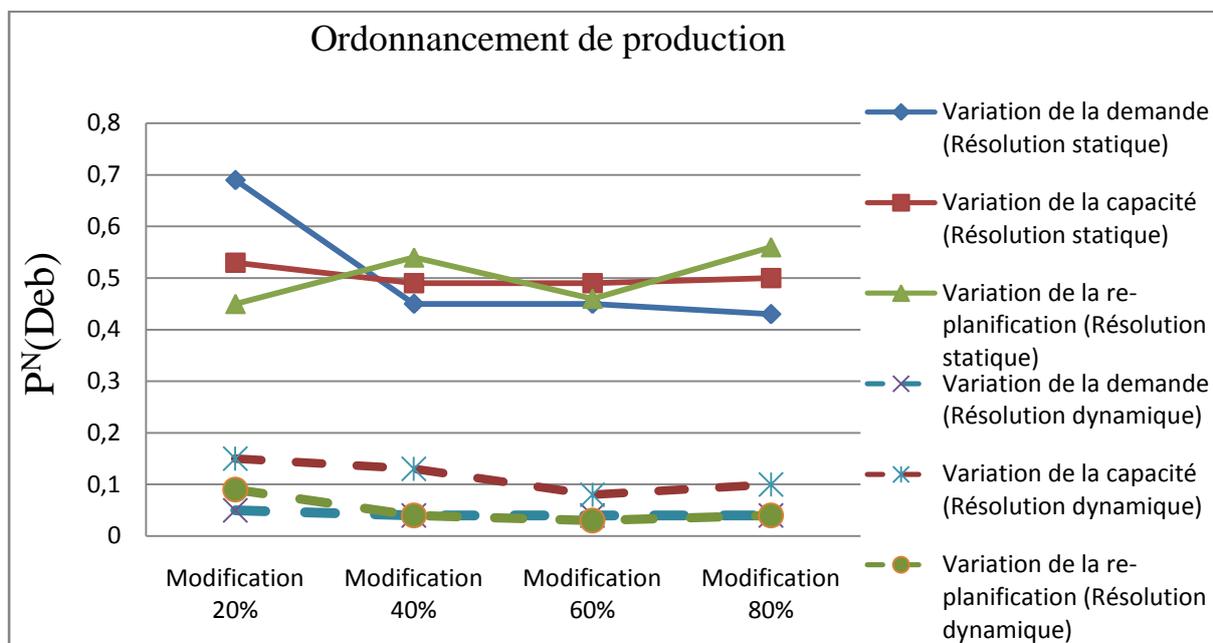


Figure V.10. Evaluation de la stabilité au niveau ordonnancement pour les 3 types de variation

Nous notons les mêmes constatations que pour le niveau planification. En présence d'une variation, indépendamment de son type (figures V.9 et V.10), la résolution statique offre une solution d'ordonnancement ayant relativement le même niveau de distance (P_{CL}^N) et de poids de perturbation (P_{CL}^E) de la chaîne logistique. Cette perturbation garde sensiblement le même niveau avec la croissance du taux de modification (de 20% à 80%).

Pour les variations de type demande, capacité et re-planification, la résolution dynamique offre une planification stable ($P_{CL}^N \approx 0$) et robuste ($P_{CL}^E \approx 0$) de la chaîne logistique.

V.4.3. Sensibilité comparative de la planification /ordonnancement face aux variations

- **Résolution statique**

Nous nous intéressons dans le cadre de ce paragraphe à comparer l'influence de chaque type de variation sur la stabilité des deux niveaux de décision et cela au niveau de toute la chaîne logistique avec une méthode de résolution statique.

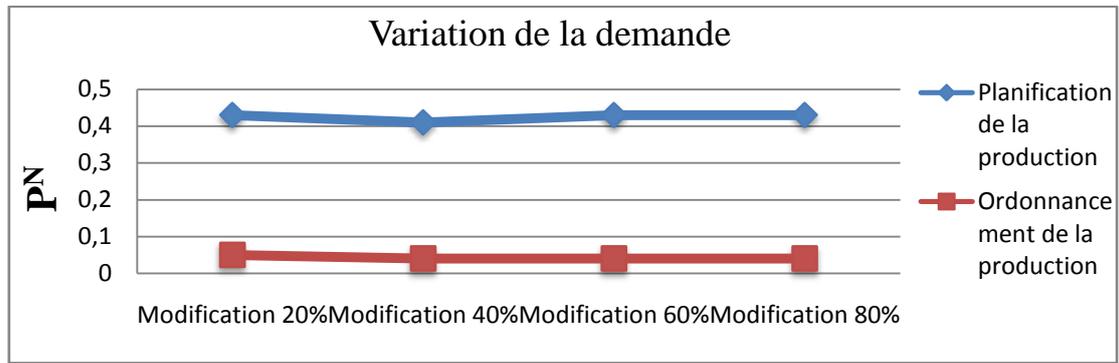


Figure V.11. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la demande

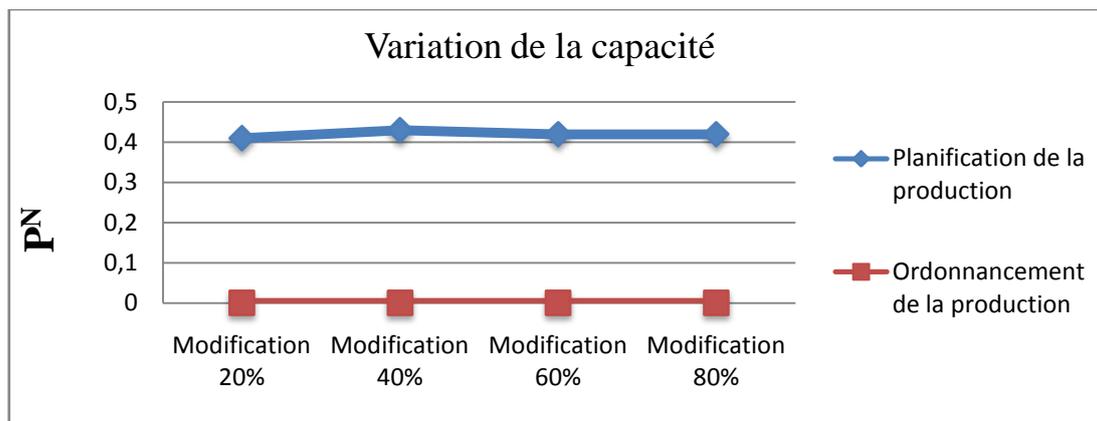


Figure V.12. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la capacité

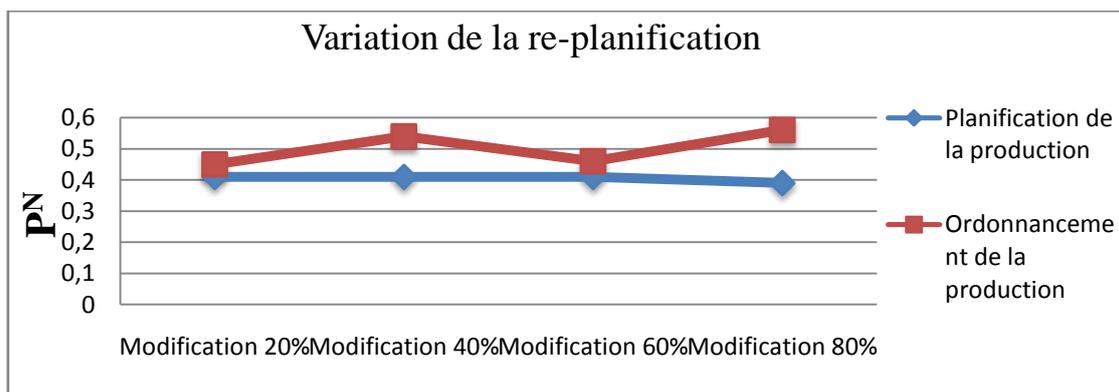


Figure V.13. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de re-planification

Pour la variation de la demande et la variation de la capacité (figure V.11, figure V.12), la résolution statique offre une solution d'ordonnement plus stable que la solution de planification. Par contre, pour la variation de re-planification (figure V.13), la solution de

planification semble être plus stable. Néanmoins, les indicateurs de stabilité sont assez proches pour les deux niveaux. Nous pouvons constater ici l'apport de l'approche intégrée que nous avons modélisée où la solution d'ordonnancement dépend fortement de la solution de planification et essentiellement de la quantité fabriquée (X) et cela à travers les contraintes de conservation d'énergie.

- Résolution dynamique

Nous nous intéressons maintenant à comparer l'influence de chaque type de variation sur la stabilité des deux niveaux de décision et cela au niveau de toute la chaîne logistique avec une méthode de résolution dynamique.

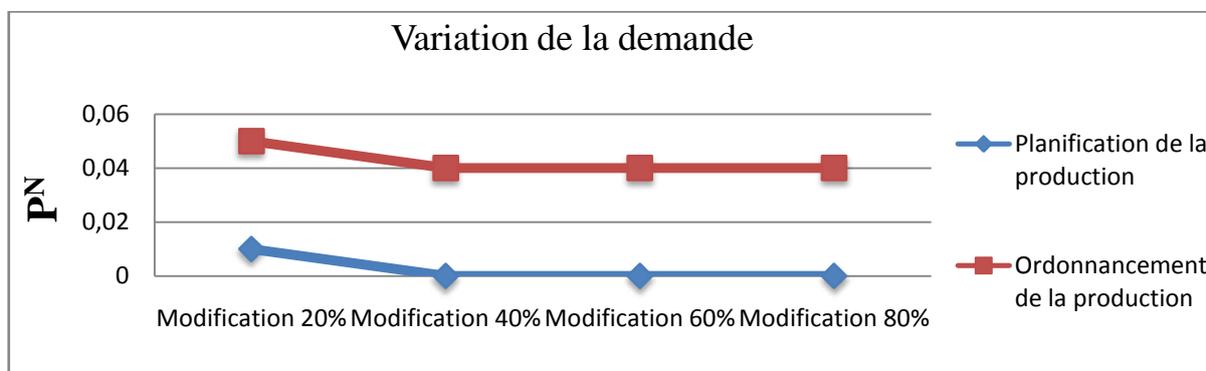


Figure V.14. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la demande

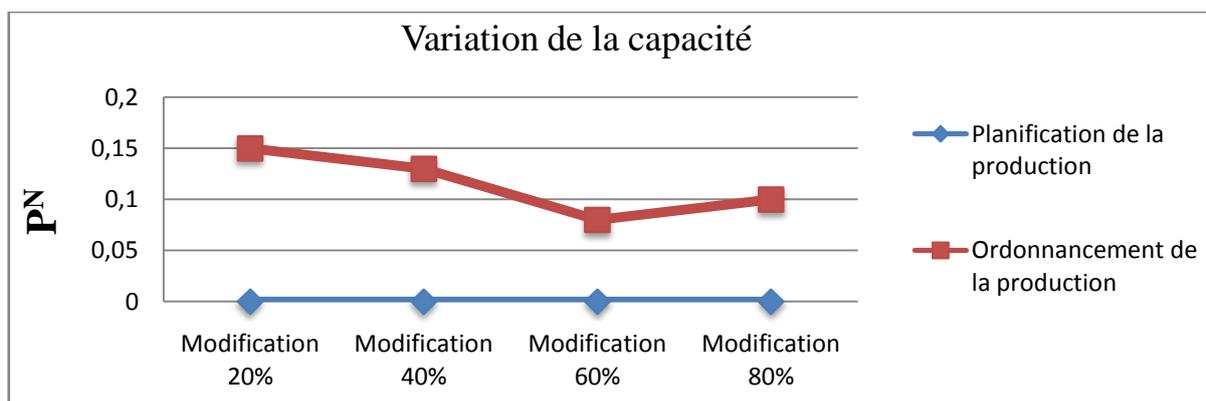


Figure V.15. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de la capacité

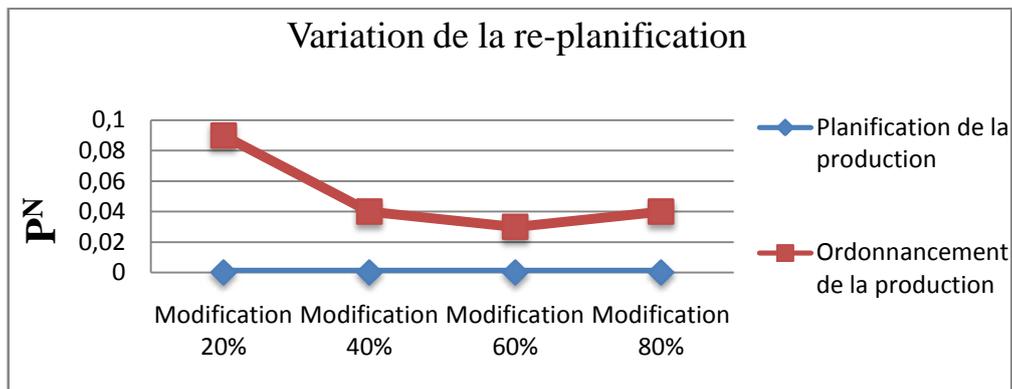


Figure V.16. Evaluation de la stabilité de la chaîne logistique par niveau de décision dans le cas d'une variation de re-planification

Indépendamment du type de la variation (figure V.14, figure V.15 et figure V.16), la résolution dynamique offre une solution de planification plus stable que la solution d'ordonnancement. Cette stabilité est plutôt relative à notre technique de résolution basée sur les réparations. En effet, les réparations n'ont pas porté sur toutes les contraintes du modèle mais sur certaines contraintes du premier niveau de décision.

V.4.4. Sensibilité de la fonction objectif face aux variations

Dans la partie précédente, nous avons évalué et comparé la stabilité et la robustesse de la solution au niveau de toute la chaîne logistique par type de variation et par niveau de décision suivant la méthode de résolution. Nous nous intéressons ici à l'évaluation du coût pour la méthode de résolution statique et la méthode de résolution dynamique et pour chaque type de variation.

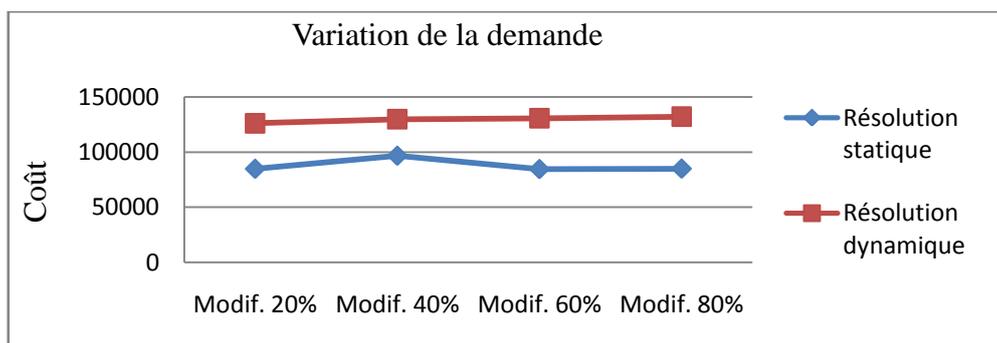


Figure V.17. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de la demande

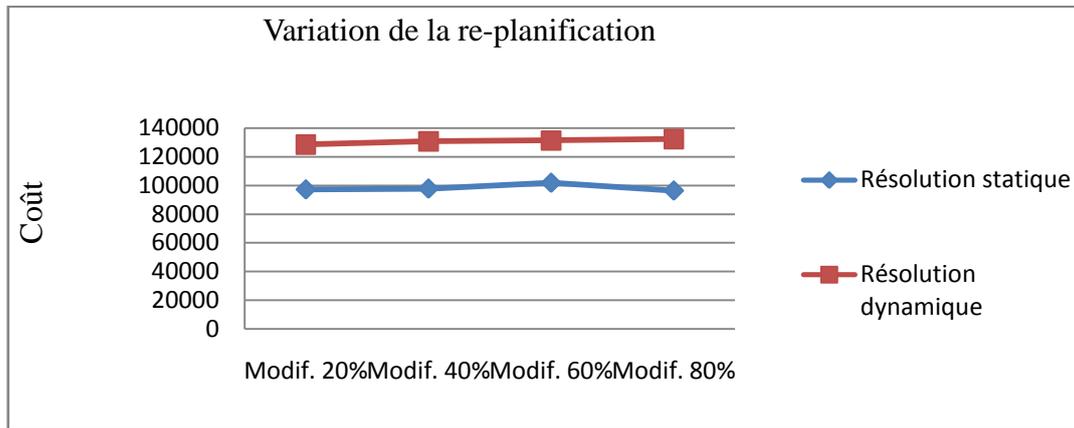


Figure V.18. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de re-planification

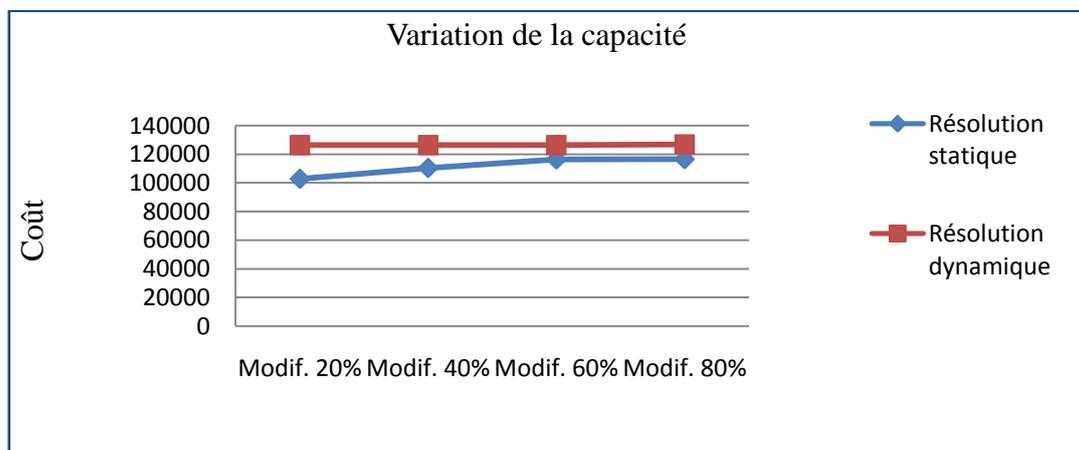


Figure V.19. Evaluation du coût dans le cas d'une variation de la capacité

V.4. 4.1. Analyse des résultats

A partir des figures (V.17, V.18 et V.19), nous établissons les constatations suivantes :

1. Avec la méthode de résolution statique, les coûts évoluent indépendamment du taux de perturbation.
2. Avec la méthode de résolution dynamique, les coûts évoluent en croissance en fonction du taux de perturbation.
3. Indépendamment du type de la variation, les coûts sont plus élevés avec une méthode de résolution dynamique qu'avec une méthode de résolution statique. Cependant, l'écart entre les coûts calculés avec les deux méthodes de résolution n'est pas grand.

V.4.4.2. Interprétation des résultats

Dans toutes les expérimentations, le coût calculé avec la méthode de résolution dynamique est plus élevé. Ceci est dû à la stratégie de recherche dynamique que nous avons choisie qui opte pour une solution plus stable sur le niveau de la planification de la production. En effet, dans le but d'avoir un plan de production le moins perturbé possible, les réparations des solutions ont porté davantage sur les stockages et les heures supplémentaires qui ont un coût plus élevé, d'où le coût global plus élevé avec la méthode de résolution dynamique.

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la performance de notre approche de planification dynamique en termes de stabilité et de robustesse. Ainsi, nous avons présenté les différentes séries d'expérimentations réalisées. Ces expérimentations ont porté sur une variation de la demande, une variation de la capacité et une variation de re-planification.

Pour les trois cas étudiés et bien que les perturbations réalisées dans chacun d'eux ne soient pas importantes, nous pouvons conclure que la résolution dynamique a montré de meilleures performances sur le plan de la stabilité et la robustesse de la solution.

Conclusion générale

La gestion de la chaîne logistique est souvent confrontée à la présence d'incertitudes concernant des données comme la capacité des ressources, les délais, les demandes des clients... ce qui peut engendrer des perturbations des systèmes de production, pouvant parfois rendre les décisions planifiées inapplicables. Cette problématique a été posée en la cernant au sein d'une entreprise composée de plusieurs sites de production réalisant différents types d'opérations (fabrication, transformation, ...) sur les produits. Elle constitue un maillon représentatif de la structure globale d'une chaîne logistique.

Tenant compte de cela, nous avons proposé une approche intégrée à deux niveaux adoptant un processus de planification dynamique à horizon glissant tel que : le premier niveau de décision permet d'optimiser les coûts globaux de la production (la minimisation maximum des coûts) et le deuxième niveau établit un ordonnancement agrégé des opérations de fabrication des produits en minimisant les en-cours. Ainsi, les décisions de production relatives au premier niveau de décision sont actualisées à chaque pas de planification et sont transmises au deuxième niveau de décision. Ces décisions sont intégrées sous la forme de contraintes dites de conservation d'énergie, qui assurent l'interaction avec le niveau inférieur.

Notre approche intégrée a été modélisée sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes dynamique. Dans ce cadre, nous associons à chaque itération de planification k un CSP (P_k) correspondant au problème de planification à résoudre. Le problème (P_{k+1}) constitue une actualisation du problème (P_k) par l'ajout ou le retrait de certaines contraintes issues de perturbations internes ou externes. En particulier, le premier niveau intègre des contraintes conditionnelles. Il se présente comme un outil d'aide à la décision en offrant la possibilité de choisir entre différents types de décision (la fabrication, la sous-traitance, les heures supplémentaires) dans le but de minimiser le coût total de la production. Le recours à la sous-traitance a été conditionné par le dépassement de la charge globale de production définie par la capacité interne de l'entreprise et le nombre d'heures supplémentaires disponibles. Le niveau ordonnancement a aussi été modélisé sous la forme d'un problème de satisfaction de

contraintes. En partant des décisions transmises par le niveau planification, il permet de déterminer les dates de début des opérations de fabrication de tous les produits sur les différents sites de productions.

Une expérimentation de ce modèle a été effectuée sous le logiciel ECL'PS^e 6.0, une extension du langage Prolog incluant des bibliothèques de programmation par contraintes. Ces expérimentations sont menées sur la base d'un cas de planification de la production d'une chaîne logistique. Les expérimentations ont porté sur la variation de la demande, la variation de la capacité et re-planification de la demande. Toutes les expérimentations sont réalisées par deux méthodes de résolution différentes : une méthode de résolution statique et une méthode de résolution dynamique.

La performance d'une solution de planification/ordonnancement est renseignée par l'ensemble des mesures de la stabilité et de la robustesse. Pour cela, nous avons développé un ensemble d'indicateurs divisé en deux catégories : la première catégorie caractérise un ensemble d'indicateurs qui caractérisent le plan établi au niveau planification ; la deuxième catégorie concerne les indicateurs qui caractérisent le plan établi au niveau ordonnancement. Pour les différents types d'expérimentations réalisées et bien que les perturbations réalisées pour chacun de ces types ne soient pas très importantes, nous pouvons conclure que la méthode de résolution dynamique a montré de meilleures performances sur le plan de la stabilité et la robustesse de la solution.

Différentes perspectives se dégagent de cette étude. Elles peuvent être regroupées en deux catégories.

1. La première catégorie est d'ordre méthodologique. Elle concerne essentiellement la structure de la chaîne logistique. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités au cas d'une entreprise qui se compose de plusieurs sites de production en interaction avec un ensemble de clients et de sous-traitants et où la distance entre les différents sites est négligeable. Il serait intéressant de se situer dans le cadre d'une entreprise multi-site et de considérer les contraintes de transport entre les différents sites de production.

2. Une deuxième catégorie est d'ordre technique.

- Une première perspective concerne l'algorithme de réparation que nous avons adopté. En effet, dans le cadre de ce travail, la réparation des contraintes non satisfaites après une certaine perturbation, est basée sur un changement des valeurs des variables appartenant à cette contrainte avec un pas toujours égal à 1 quelle que soit la contrainte. Il serait intéressant de développer des scénarios de réparation différents adaptés à chaque type de contrainte.
- Les différentes expérimentations réalisées montrent la performance de la méthode de résolution par CSP dynamique par rapport à la méthode de résolution par CSP statique. Cependant, les perturbations réalisées sont peu diversifiées. Des perturbations portant sur d'autres aspects aideront à mieux caractériser les performances de l'approche dynamique. Il sera intéressant d'étudier l'influence d'autres paramètres liés à la planification comme le pas de planification, la longueur de l'horizon gelé ou à la technique de résolution (examiner d'autres méthodes de recherche de solutions).
- Un deuxième axe serait d'étudier des méthodes de résolution dynamique alternatives comme la programmation linéaire en nombres entiers ou les méta-heuristiques et d'analyser leur performance par rapport à la méthode de résolution par CSP dynamique.

Références bibliographiques

[Amrani-Zouggar, 2009] 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, 1965] Anthony R. N., *Planning and Control Systems: A framework for analysis*. Harvard University, Graduate School of Business Administration, Cambridge, Massachussets, 1965.

[Ashayeri et Selen, 2003] Ashayeri J. et Selen W., Production planning model and a case study for the pharmaceutical industry in the Netherlands. *International Journal of logistics: Research and applications*, 6: 37-49, 2003.

[Axsater et Jonsson, 1984] Axsater S. et Jonsson H., Aggregation and disaggregation in hierarchical production planning. *European Journal of Operational Research*, 17: 338-350, 1984.

[Bellicha, 1993] Bellicha A., Maintenance of solution in a dynamic constraint satisfaction problem. In *proceedings of applications of artificial intelligence in Engineering VIII*, pages 261-274, 1993.

[Berry *et al.*, 1994] Berry D., Towill D.R. et Wadsley N., Supply Chain Management in the Electronics Products Industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(10): 20-32, 1994.

[Bertalanffy, 1968] Bertalanffy L., *General System Theory*. George Braziller, 1968.

[Bertsimas et Sim, 2004] Bertsimas D. et Sim M., The Price of Robustness. *Operations Research*, 52: 35-53, 2004.

[Bessière, 1991] Bessière C., Arc consistency in dynamic constraint satisfaction problems. In *Proceedings of AAAI'91*, Anaheim, CA, USA, pages 221-226, 1991.

[Bessière, 1992] Bessière C., Arc-consistency for non-binary dynamic CSPs. In *Proceedings of ECAI'92*, Vienna, Austria, pages 23-27, 1992.

[Bessière et Régin, 2001] Bessière C. et Régin J., Refining the Basic Constraint Propagation Algorithm. In *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'01)*, Seattle, WA, USA, pages 309-315, 2001.

[Bessière et al., 2005] Bessière C., Régin J., Yap R. et Zhang Y., An optimal coarse-grained arc consistency algorithm. *Artificial Intelligence*, 2(165): 165-185, 2005.

[Bitner et Reingold, 1975] Bitner J. et Reingold E., Backtracking programming techniques. *Communications of the ACM*, 18(11): 651-656, 1975.

[Bitran et Hax, 1977] Bitran G. et Hax A., On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Sciences*, 8(1): 28-55, 1977.

[Billaut et al., 2005] Billaut J.C., Moukrim A. et Sanlaville E. (sous la direction de), *Flexibilité et robustesse en ordonnancement*. Paris, Lavoisier.

[Blondel, 1997] Blondel F., *Gestion de la production*. Dunod, 1997.

[Botta-Genoulaz, 2003] Botta-Genoulaz V., *Les systèmes d'information supports à la chaîne Logistique*. Ecole d'été d'automatique - Gestion de la Chaîne Logistique, Session 24, Grenoble, France, 2003.

[Bourrières et al., 2005] Bourrières J.P., Grabot B. et Mercé C., Pilotage des systèmes multi-sites de production : Outils industriels et méthodes avancées. *Techniques de l'Ingénieur*, S7662, 15 pages, 2005.

[Camalot, 2000] Camalot J.P., *Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 2000.

[Chetouane, 1999] 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.

[Courtois *et al.*, 1995] Courtois A., Martin-Bonnefous C. et Pillet M., *Gestion de Production*. Les éditions d'organisations, 3ème édition, Paris, 1995.

[Croom *et al.*, 2000] Croom S., Romano O. et Giannakis M., Supply chain management : an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6: 67-83, 2000.

[Dauzère-Pérès, 1992] Dauzère-Pérès S., *Planification et ordonnancement de la production: une approche intégrée cohérente*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1992.

[Dauzère-Pérès et Lasserre, 1994] Dauzère-Pérès S. et Lasserre J.-B., Integration of lot sizing and scheduling decisions in a job-shop. *European Journal of Operational Research*, 75(2): 413-426, 1994.

[Dauzère-Pérès et Lasserre, 2002] Dauzère-Pérès S. et Lasserre J.-B., On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. *International Transactions in Operational Research*, 9(6): 779-793, 2002.

[Debruyne, 1994] Debruyne R., *DnAC-6*. Technical Report 94054, LIRMM, 1994.

[Debruyne, 1995] Debruyne R., Les algorithmes d'arc-consistance dans les CSP dynamiques. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 1, 9(3): 239-268, 1995.

[Debruyne, 1996] Debruyne R., Arc-consistency in dynamic CSPs is no more prohibitive. In *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'96)*, pages 299–306, 1996.

[Debruyne *et al.*, 2003] Debruyne R., Ferrand G., Jussien N., Lesaint W., Louis S. et Tessier A., Correctness of constraint retraction algorithms. In *Proceedings of the 16th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS'03)*, St. Augustine, FL, USA, 2003.

[Dechter et Dechter, 1988] Dechter R. et Dechter A., Belief maintenance in dynamic constraints networks. In *Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'88)*, pages 37-42, 1988.

- [Dechter, 1990] Dechter R., Enhancement schemes for constraint processing : Backjumping, learning and cut set decomposition. *Artificial Intelligence*, 41:273–312, 1990.
- [Despontin-Monsarrat, 2004] Despontin-Monsarrat E., *Aide à la décision pour une coopération interentreprises dans le cadre de la production à la commande*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
- [Dolgui et Proth, 2006] Dolgui A. et Proth J.M., Les systèmes de production modernes. Volume 1, *Lavoisier*, Paris, 2006.
- [Dominguez et Lashkari, 2004] Dominguez H. et Lashkari R.S., Model for integrating the supply chain of an appliance company: a value of information approach, *International Journal of Production Research*, 42(11): 2113-2140, 2004.
- [Durieux et Pierreval, 2003] Durieux S. et Pierreval H., De la notion de robustesse dans les études de simulation. In *Actes de la 4^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'03)*, Toulouse, 2003.
- [Elkhiary, 2003] Elkhiary A., *Outils d'aide à la décision pour des problèmes d'ordonnancement dynamiques*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes, France, 2003.
- [Esquirol et Lopez, 1999] Esquirol P., et Lopez P., *L'ordonnancement*. Economica, Paris, 1999.
- [Faltings et Macho-Gonzalez, 2005] Faltings B. et Macho-Gonzalez S., Open Constraint programming. *Artificial Intelligence*, 161(1-2): 181-208, 2005.
- [Fargier *et al.*, 1996] Fargier H., Lang J. et Schiex T., Mixed constraint satisfaction: A framework for decision problems under incomplete knowledge. In *Proceedings of the 13th National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI'96)*, pages 175-180, 1996.
- [Fischer, 2000] Fischer X., *Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée application aux appareils à pression*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Bordeaux, 2000.

[Fontan et Imbert, 1985] Fontan G. et Imbert S., Interaction between the two levels of decision making in a job shop. *Congrès EURO IV*, Bologne, 1985.

[Fontan *et al.*, 1997] Fontan G., Mercé C. et Lasserre J., *Concepts et outils pour les systèmes de production*. Chapitre 3 de l'ouvrage collectif coordonné par J.-C. Hennet, Cépaduès Editions, 1997.

[Fontan *et al.*, 2001] Fontan G., Mercé C. et Erschler J., La planification des flux de production. In *Performance Industrielle et Gestion des flux* (P. Burlat, J.P. Campagne), Hermers Science Publications Traité IC2, 2001.

[Fontan *et al.*, 2005] Fontan G., Mercé C., Lasserre J.-B. et Hennet J.-C., Hierarchical scheduling for decision support, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(2):235-242, 2005.

[Fowler et Brown, 2000a] Fowler D. et Brown K., Branching constraint satisfaction problems for solutions robust under likely changes. In *Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 500-504, 2000.

[Fowler et Brown, 2000b] Fowler D. et Brown K., Branching constraint satisfaction problems. *Technical report*, Dept. of Computing Science, Univ of Aberdeen, 2000.

[François, 2007] François J., *Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2007.

[Galasso, 2007] Galasso F., *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[Ganeshan *et al.*, 1998] Ganeshan R., Jack E., Magazine M.J. et Stephens P., A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research. In *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pages 841-880, 1998.

[Génin, 2003] 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 Chang, 2001] 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.*, 2009] Gharbi H., Merce C., Fontan G. et Moalla M., Supply Chain Hierarchical Planning Under Demand Uncertainty. *IEEE*, 2009.

[Gharbi, 2012] Gharbi H., *Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 2012.

[Giard, 1988] Giard V., Gestion de la production. *Economica*, collection Gestion, 1988.

[Giard, 2003] Giard V., Gestion de la production et des flux, *Economica*, 2003.

[Giglio et Minciardi, 2002] Giglio D. et Minciardi R., Integration of production planning and scheduling in manufacturing systems. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5, 2002.

[Gomes *et al.*, 1998] Gomes C., Selman B. et Kautz H., Boosting Combinatorial Search Through Randomization. In *Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'98)*, Madison, WI, USA, pages 431-437, 1998.

[Gotha, 1993] Gotha, Les problèmes d'ordonnancement. *RAIRO- Recherche opérationnelle/Operations Research*, 27(1) : 77-150, 1993.

[Grangeon, 2001] Grangeon N., *Métaheuristiques et modèles d'évaluation pour le problème du flow shop hybride hiérarchisé : contexte déterministe et contexte stochastique*. Thèse de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 2001.

[Gunasekaran *et al.*, 2006] Gunasekaran A., Ngai E.W.T et McGaughey R.E, Information technology and systems justification: A review for research and applications. *European Journal of Operational Research*, 173(3): 957-983, 2006.

[Hammer et Champy, 1993] Hammer M. et Champy J., Le reengineering. *Dunod*, Paris, 1993.

[Haralick et Elliot, 1980] Haralick R. et Elliott G., Increasing Tree Search Efficiency for Constraint Satisfaction Problems. *Artificial Intelligence*, 14(3):263-313, 1980.

[Harvey et Ginsberg, 1995] Harvey W. et Ginsberg M., Limited Discrepancy Search. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, Montréal, Canada, pages 607-613, 1995.

[Hentenryck et Provost, 1991] Hentenryck P.V. et Provost T.L., Incremental search in constraint logic programming. *NewGener. Comput.*, 9: 257-275, 1991.

[Hernandez-Silva, 2008] Hernandez-Silva J., *Approche multi-niveau et ordonnancement d'activités dans un contexte de production à la commande*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2008.

[Herrera et Thomas, 2009] Herrera C. et Thomas A., Un modèle pour limiter la nervosité et l'instabilité du programme directeur de production. In *8^{ème} congrès international de génie industriel*, Bagnères de Bigorre, France, 2009.

[Hétreux, 1996] 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, France, 1996.

[Heisig 1998] Heisig G., Planning stability under (s,S) inventory control rules. *OR Spektrum* 20(4): 215-228, 1998.

[Ho, 1989] Ho C., Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *International Journal of Production Research*, 27: 1115-1135, 1989.

[Huang *et al.*, 2003] 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): 1483-1517, 2003.

[Huber, 1981] Huber P.J., *Robust Statistics*. John Wiley & Sons, 1981.

[Huguet, 1994] Huguet M.J., *Approche par contrainte pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1994.

[Jagdev *et al.*, 2003] Jagdev H.S., Brennan A. et Browne J., Strategic decision making in modern manufacturing. *Kluwer Academic Publishers*, London, 2003.

[Jensen, 1993] Jensen T., Measuring and improving planning stability of reorder point lot-sizing policies. *International Journal of Production Economics*, 30-31: 167-178, 1993.

[Johnson et Montgomery, 1974] Johnson L.A. et Montgomery D.C., Operations research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control. *Wiley*, 1974.

[Jones et Riley, 1985] Jones T. et Riley D., Using inventory for competitive advantage through Supply Chain Management. *International Journal of Physical Distribution and Material Management*, 15(5): 16-26, 1985.

[Jussien et Lhomme, 2002] Jussien N. et Lhomme O., Local search with constraint propagation and conflict-based heuristics. *Artif. Intell.*, 139: 21-45, 2002.

[Kelton, 1999] Kelton W.D., Designing Simulation Experiments. In *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, pages 33-38, 1999.

[Kleijnen et Gaury, 2003] Kleijnen J.P.C. et Gaury E., Short-term robustness of production management systems: A case study. *European journal of operational research*, 148: 452-465, 2003.

[Lambert et Cooper, 2000] Lambert D.M. et Cooper M.C., Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29: 65-83, 2000.

[Lalami, 2012] Lalami M.E., *Contribution à la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire : méthodes séquentielles et parallèles*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2012.

- [La Londe et Masters, 1994] La Londe B.J. et Masters J.M., Emerging Logistics Strategies : Blueprints for the next century. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 24(7): 35-47, 1994.
- [Lee et Billington, 1993] Lee H.L. et Billington C., Material management in decentralized supply chain. *Operations Research*, 41(5), 1993.
- [Lemoigne, 1974] Lemoigne J.L., Les systèmes de décision dans les organisations. *Presses Universitaires de France*, 1974.
- [Lopez, 1991] Lopez P., *Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1991.
- [Lopez, 2001] Lopez P., Le concept de contraintes : propagation, satisfaction, programmation. « *Contraintes* » - *GRP*, Toulouse, France, 2001.
- [Lorino, 1995] Lorino P., Comptes et Récits de la Performance, Essai sur le pilotage de l'Entreprise. *Editions d'Organisation*, page 288, Paris, 1995.
- [Mackworth, 1977] Mackworth A.K., Consistency in networks of relations. *Artif. Intell.*, 8(1) : 99-118, 1977.
- [Mahmoudi, 2006] Mahmoudi J., *Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques : Application au secteur de l'électronique et des télécommunications*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'Espace, 2006.
- [Mehra *et al.*, 1996] Mehra A., Minis I. et Proth J.M., Hierarchical production planning for complex manufacturing systems. *Advances in Engineering Software*, 26: 209-218, 1996.
- [Mentzer *et al.*, 2001] Mentzer J.T., Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D. et Zacharia Z.G., Defining supply chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22(2) : 1-25, 2001.
- [Mercé, 1987] Mercé C., *Cohérence des décisions en planification hiérarchisée*. Thèse d'état de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.

[Mercé et Fontan, 2001] Mercé C. et Fontan G., Hiérarchisation de la fonction planification. In *Organisation et Gestion de Production* (J. Erschler, B. Grabot), *Hermès Sciences Publication*, Traité IC2, 2001.

[Miler, 2001] Miller T., Hierarchical operations and supply chain planning. *Springer*, 2001.

[Min et Zhou, 2002] Min H. et Zhou G., Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43: 231-249, 2002.

[Minton *et al.*, 1992] Minton S., Johnston M.D., Philips A.B. et Laird P., Minimizing conflicts: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems. *Artificial Intelligence*, 58:161–205, 1992.

[Mittal et Falkenhainer, 1990] Mittal S. et Falkenhainer B., Dynamic constraint satisfaction problems. In *AAAI'90*, pages 25-32, Boston, US, 1990.

[Mohr et Henderson, 1986] Mohr R. et Henderson T.C., Arc and path consistency revisited. *Artificial Intelligence*, 28: 225-233, 1986.

[Mokhtari *et al.*, 2013] Mokhtari H., Nakhai I. et Abadi K., Scheduling with an outsourcing option on both manufacturer and subcontractors. *Computers and Operations Research*, 40 : 1234-1242, 2013.

[Moncel, 2010] Moncel J., Minimisation des encours sur une machine pour des tâches sujettes à des phénomènes d'usure ou d'apprentissage. In *11^e congrès de la société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision (Roade'10)*, page 171, 2010.

[Monk, 2005] Monk E., Concepts in Enterprise Resource Planning. *Course Technology 2nd ed.*, 2005.

[Montanari, 1974] Montanari U., Networks of constraints: fundamental properties and application to picture processing. *Information Science*, 7, 1974.

[Nadel, 1989] Nadel B., Constraint Satisfaction Algorithms. *Computational Intelligence*, 5: 188-299, 1989.

- [Nayaket *al.*, 2001] Nayak N., Bhaskaran K. et Das R., Virtual Enterprises - Building Blocks for Dynamic e-Business. In *Proceedings of Information Technology for Virtual Enterprises workshop IEEE*, pages 80–87, 2001.
- [Orlicky, 1975] Orlicky J.A., Material Requirements Planning. *McGraw-Hill Book Co*, New York, 1975.
- [Oustaloup, 1994] Oustaloup A., La robustesse : analyse et synthèse de commande robuste. *Traité des nouvelles technologies, Hermès, série Automatique*, Paris, 1994.
- [Ozdamar et Barbarosoglu, 2000] Ozdamar L. et Barbarosoglu G., An integrated lagrangean relaxation-simulated annealing approach to the multi-level multi-item capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Economics*, 68(3): 319-331, 2000.
- [Richaud, 2009] Richaud G., *Outillage logiciel pour les problèmes dynamiques*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes, France, 2009.
- [Rota, 1998] Rota K., *Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources : application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique*. Thèse de doctorat, Sup'aéro, France, 1998.
- [Rota-Frantz *et al.*, 2001] Rota-Frantz K., Bel G. et Thierry C., Gestion des flux dans les chaînes logistiques. In *Performance Industrielle et gestion des flux*, pages 153-187, Hermes Science, 2001.
- [Roy, 1998] Roy B., A missing link in operational research decision aiding: robustness analysis. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 23(3): 141-160, 1998.
- [Roy, 2005] 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), Hermes Science Publications, Traité IC2, 2005.
- [Sabin et Freuder, 1994] Sabin D. et Freuder E., Contradicting conventional wisdom in constraint satisfaction. In *Proceedings of the 11th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'94)*, Amsterdam, The Netherlands, pages 125-129, 1994.

[Sakka, 2012] Sakka O., *Alignement sémantique entre référentiels d'entreprise - Application aux systèmes d'exécution de la fabrication (MES)*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2012.

[Schiex *et al.*, 1995] Schiex T., Fargier H. et Verfaillie G., Valued constraint satisfaction problems: Hard and easy problems. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, Montréal, Canada, pages 631-637, 1995.

[Schwalb et Dechter, 1991] Schwalb E. et Dechter R., Processing disjunctions in temporal constraint networks. *Artificial Intelligence*, 49: 61–95, 1991.

[Shapiro, 1998] Shapiro J., Bottom-up versus top-down approaches to supply chain modeling. In *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, pages 739-759, 1998.

[Simchi-Levi *et al.*, 2003] Simchi-Levi D., Kamnisky P. et Simchi-Levi E., Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies. *McGraw-Hill/Irwin*, New York, second edition, 2003.

[Sikora *et al.*, 1996] Sikora R., Chhajed D. et Shaw M., Integrating the lot-sizing and sequencing decisions for scheduling a capacitated flow line. *Computers and Industrial Engineering*, 30(4): 659-679, 1996.

[Sridharan, 1990] Sridharan S.V. et Laforge R.L., An analysis of alternative policies to achieve schedule stability. *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 3:53-73, 1990.

[Stadtler et Kilger, 2005] Stadtler H. et Kilger C. (Ed.), *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 3^e ed. (Springer: Berlin), 2005.

[Taguchi, 1987] Taguchi G., *Orthogonal arrays and linear graph*, American Supplier Institute press, 1987.

[Tan, 2001] Tan K.C., A framework of supply chain management literature. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 7: 39-48, 2001.

- [Tayur *et al.*, 1999] Tayur S., Ganeshan R. et Magazine M., Quantitative models for supply chain management. *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [Thierry, 2003] 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 Griffin, 1996] Thomas D.J. et Griffin P.M., Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94: 1-15, 1996.
- [Thomas, 2003] Thomas A., *Impact du concept de chaîne logistique sur les systèmes de gestion de production - Le nouveau rôle de la planification tactique et les nouveaux outils*. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique, Session 24, Grenoble, France, 2003.
- [Timpe, 2004] Timpe C., Solving planning and scheduling problems with combined integer and constraint programming. *OR Spectrum*, 24(4): 431 -448, 2004.
- [Trojet *et al.*, 2010] Trojet M., H'Mida F. et Lopez P., Project scheduling under resource constraints: Application of the cumulative global constraint in a decision support framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61(2): 357-363, 2010.
- [Trombettoni, 1993] Trombettoni G., A constraint maintenance algorithm based on value propagation. In *Poster in the 6th Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA '93)*, éd. Par Filgueras (Miguel) et Damas (Luis), page 360, Porto, Portugal, 1993.
- [Tsang, 1993] Tsang E., Foundations of constraint satisfaction. *Academic Press INC*, 1993.
- [Tsubone *et al.*, 2002] Tsubone H., Ishikawa Y. et Yamamoto H., Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products. *International Journal of Production Research*, 40: 4835-4851, 2002.
- [Tung *et al.*, 1999] Tung L., Lin L. et Nagi R., Multiple-objective scheduling for the hierarchical control of flexible manufacturing systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11: 379 - 409, 1999.

- [Tsukiyama *et al.*, 1998] Tsukiyama M., Mori K. et Fukuda T., Hierarchical distributed algorithm for large scale manufacturing systems. *IFAC IFORS IMACS IFIP Symposium on large scale systems theory and applications*, Patras, Greece, 1998.
- [Van Wassenhove et Potts, 1991] Van Wassenhove L. et Potts C.N., Integrating scheduling with batching and lot-sizing: A review of algorithms and complexity. *Working paper n°91/10/TM*, Insead, Fontainebleau, France, 1991.
- [Vareilles, 2005] Vareilles E., *Conception et approches par propagation de contraintes : contribution à la mise en œuvre d'un outil d'aide interactif*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, France, 2005.
- [Verfaillie et Schiex, 1994a] Verfaillie G. et Schiex T., Solution reuse in dynamic constraint satisfaction problems. In *Proceedings of the 12th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'94)*, pages 307-312, 1994.
- [Verfaillie et Schiex, 1994b] Verfaillie G. et Schiex T., Dynamic backtracking for dynamic constraint satisfaction problems. In *Proceedings of the (ECAI'94) Workshop on Constraint Satisfaction Issues Raised by Practical Applications*, pages 1-8, Amsterdam, 1994.
- [Verfaillie et Schiex, 1995] Verfaillie G. et Schiex T., Maintien de solutions dans les problèmes dynamiques de satisfaction de contraintes : bilan de quelques approches. In *Revue d'Intelligence Artificielle*, 9(3): 269-310, 1995.
- [Verfaillie et Jussien, 2005] Verfaillie G. et Jussien N., Constraint solving in uncertain and dynamic environments : A survey. *Constraints*, 10(3): 253-281, 2005.
- [Vincke, 2003] Vincke P., About Robustness Analysis. In *Newsletters of the European Working Group "Multicriteria Aid for Decisions"*, number 8 in 3, pages 7-9, 2003.
- [Vobet Woodruff, 2006] Vob S. et Woodruff D.L., Introduction to Computational Optimization Models for Production Planning in a Supply Chain. *2nd edition Springer*, 2006.
- [Vollmann *et al.*, 1997] Vollmann T.E., Berry W.L. et Whybark D.C., Manufacturing planning and control systems. *4th ed.*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1997.

- [Wallace et Grimes, 2010] Wallace R.J. et Grimes D., Problem-structure versus solution-based methods for solving dynamic constraint satisfaction problems. In *Proceedings of the 22nd international conference on tools with artificial intelligence (ICTAI'10)*, IEEE, 2010.
- [Walsh, 2002] Walsh T., Stochastic constraint programming. In *Proceedings of the 15th ECAI, European Conference on Artificial Intelligence*, IOS, pages 111-115, Press, 2002.
- [Wolf et Chen, 1995] Wolf J. et Chen M., A hierarchical approach to parallel multiquery scheduling. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed systems*, 6(6): 578-590, 1995.
- [Wolosewicz, 2008] Wolosewicz C., *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Gardanne, France, 2008.
- [Yan *et al.*, 2004] Yan H., Zhang X. et Jiang M., Hierarchical production planning with demand constraints. *Computers and industrial engineering*, 46(3): 533-551, 2004.
- [Yano, 1987] Yano C.A. et Carlson R.C., Interaction between frequency of rescheduling and the role of safety stock in material requirements planning systems. *International Journal of Production Research*, 25: 221-232, 1987.
- [Zaidi *et al.*, 2010] Zaidi M., Jarboui B., Loukil T. et Kacem I., Hybrid meta-heuristics for uniform parallel machine to minimize total weighted completion time. In *8th International Conference of Modeling and Simulation*, 2010.
- [Zapfel, 1998] Zapfel G., Customer-order-driven production: An economical concept for responding to demand uncertainty. *International journal of production economics*, 56/57, pages 699-709, 1998.
- [Zhang et Yap, 2001] Zhang Y. et Yap R., Making AC-3 an Optimal Algorithm. In *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'01)*, Seattle, WA, USA, pages 316-321, 2001.

Titre : « Planification d'une chaîne logistique : Approche par satisfaction de contraintes dynamiques »

Résumé :

Le sujet de thèse porte sur la planification tactique et opérationnelle d'une chaîne logistique dans un contexte dynamique. Nous proposons un modèle de planification basé sur une structure décisionnelle à deux niveaux. Adoptant un processus dynamique permettant d'actualiser les données à chaque étape de planification, le premier niveau planifie la production en recherchant le meilleur compromis entre les leviers décisionnels disponibles liés aux aspects capacité et coût de production. Le deuxième niveau établit un ordonnancement agrégé des opérations de fabrication en minimisant les en-cours. Le recours à une structure décisionnelle intégrée nous a conduit à établir une interaction entre les niveaux supérieur et inférieur de décision, mise en œuvre par des contraintes dites de conservation d'énergie.

Notre approche est modélisée sous la forme d'un problème de satisfaction de contraintes (*CSP*, *Constraint Satisfaction Problem*) et évaluée par simulation dans un contexte de données incertaines. Nous avons mené différentes expérimentations portant sur la variation de la demande, la variation de la capacité et la re-planification de la demande. Toutes les expérimentations sont réalisées par deux méthodes de résolution différentes : une méthode basée sur un CSP statique et une méthode basée sur un CSP dynamique. La performance d'une solution de planification/ordonnancement est renseignée par l'ensemble des mesures de la stabilité et de la robustesse. Les expérimentations réalisées offrent une démonstration de la performance de la méthode de résolution basée sur un CSP dynamique par rapport à la méthode statique.

Mots-clés : Chaîne logistique, Planification / Ordonnancement, Approche intégrée, Problèmes de satisfaction de contraintes (CSP), CSP dynamique, Stabilité, Robustesse.

Title: "Supply chain planning: A dynamic constraint satisfaction approach"

Abstract:

This work focuses on the supply chain operational and tactical planning problem in an uncertain environment. We propose a tactical planning model, based on a two-level decisional structure. Adopting a dynamic process, which enables data updating at each planning step, the first level performs a plan by searching for the best compromise between available decision-making levers for production costs and capacity. The second level establishes an aggregate scheduling of production tasks by minimizing the total weighted completion time. The use of an integrated decision structure involves interaction between the upper and lower decision levels constraints, implemented by constraints known as energy conservation constraints.

Our approach is formulated according to a constraint satisfaction problem (*CSP*) and evaluated by simulation under uncertain data. For this, we have developed various experiments related to the variation of customer demand, resource capacity, and the re-planning of demand. All the experiments are carried out by two different methods: a method based on a static CSP and a method based on a dynamic CSP. The performance of a scheduling/planning solution is reported through a set of robustness and stability measurements. Results of experiments confirm the performance of the method based on a dynamic CSP.

Keywords: Supply chain, Planning / Scheduling, Integrated approach, Dynamic Constraint Satisfaction, Stability, Robustness.