



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	2005 001 S
Cote	S/17 05/01
Loc	mag. reserve

THESE

Présentée par

Latifa OUZIZI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ

(arrêté ministériel du 30 Mars 1992)

en **AUTOMATIQUE Spécialité : PRODUCTIQUE**

Ecole doctorale Informatique, Electronique - Electrotechnique,
Mathématiques (IAEM)

Planification de la production par co-décision et négociation de l'entreprise virtuelle

Date de soutenance: 28 Janvier 2005

Composition du jury :

Rapporteurs :

Bernard GRABOT, *Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France)*

Michel GOURGAND, *Professeur, Université Blaise Pascal – Clermont-Fd II (France)*

Abdelghani CHERKAoui, *Professeur, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (Maroc)*

Examineurs :

Bernard DESCOTES-GENON, *Professeur, Université Joseph Fourier Grenoble (France)*

François VERNADAT, *Professeur, Université de Metz, Directeur de thèse (France)*

Ahmed KHMOU, *Professeur, Université Moulay Ismail, Directeur de thèse (Maroc)*

Marie Claude PORTMANN, *Professeur, Ecole des Mines de Nancy (France)*

Invité :

Didier ANCLAUX, *Maître de conférences, Université de Metz (France)*

Thèse préparée au sein du Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique
à l'Université de Metz

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE METZ



031 536127 4

THESE

Présentée par

Latifa OUZIZI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ

(arrêté ministériel du 30 Mars 1992)

en **AUTOMATIQUE Spécialité : PRODUCTIQUE**

Ecole doctorale Informatique, Electronique - Electrotechnique,
Mathématiques (IAEM)

Planification de la production par co-décision et négociation de l'entreprise virtuelle

Date de soutenance: 28 Janvier 2005

Composition du jury :

Rapporteurs :

Bernard GRABOT, *Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France)*

Michel GOURGAND, *Professeur, Université Blaise Pascal – Clermont-Fd II (France)*

Abdelghani CHERKAoui, *Professeur, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (Maroc)*

Examineurs :

Bernard DESCOTES-GENON, *Professeur, Université Joseph Fourier Grenoble (France)*

François VERNADAT, *Professeur, Université de Metz, Directeur de thèse (France)*

Ahmed KHMOU, *Professeur, Université Moulay Ismail, Directeur de thèse (Maroc)*

Marie Claude PORTMANN, *Professeur, Ecole des Mines de Nancy (France)*

Invité :

Didier ANCIAUX, *Maître de conférences, Université de Metz (France)*

Thèse préparée au sein du Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique
à l'Université de Metz

Remerciements

Ce travail a été effectué en cotutelle avec l'Université de Metz au sein du Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique et avec l'équipe MACSI (Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Industriels) de l'INRIA Lorraine et l'Université Moulay Ismail de Meknès au sein du Laboratoire Instrumentations et Physique des Matériaux.

J'exprime toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur François VERNADAT, de m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche et d'avoir accepté de diriger ce travail. Qu'il soit remercié en premier pour sa grande disponibilité, son suivi continu, ses conseils constructifs et la qualité de ses idées qui m'ont permis d'atteindre la finalité de ce travail.

Je ne saurais jamais comment exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Ahmed KHMOU de m'avoir guidé et conseillé au long de mes travaux de DESA et de thèse.

C'est avec une profonde gratitude que je m'exprime envers mon codirecteur le professeur Marie Claude PORTMANN. Je lui rends un hommage tout particulier pour sa contribution active, ses idées précieuses et son soutien tout au long de ce travail.

Ma gratitude et mes remerciements vont ensuite aux membres de jury :

A M. Bernard DESCOTES-GENON, malgré son absence à cause d'une force majeure, qui a accepté de présider le jury de la thèse.

A messieurs les professeurs Bernard GRABOT, Michel GOURGAND, Abdelghani CHERKAoui, d'avoir accepté de rapporter ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

A M. Didier ANCIAUX d'examiner le travail et nous honorer par sa présence au jury.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Mohamed BOUIDIDA directeur de l'ENSAM de Meknès de m'avoir autorisé à poursuivre mes études de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Je n'oublierais de remercier les membres du laboratoire LGIPM et de l'équipe MACSI, en particulier Wahiba, Lyes et Amar pour leurs conseils et leurs soutiens. Sans oublier mes amis du laboratoire en particulier Sofiene et Zied ainsi que mes amis Hajar, Souad M., Souad E, Olfa, Mohamed, Lhassane et Zakaria.

Que Cathy, Christel et Françoise trouvent l'expression de reconnaissance et d'amitié pour leur aide et leurs services durant tous mes séjours en France.

J'aimerais dire à tous ceux dont je n'ai pas cité les noms et qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, que je suis amplement reconnaissante.

Mes remerciements et ma gratitude vont à ceux à qui je dois l'essentiel, en particulier à mes parents, Ahmed, Aicha, mes chers frères et sœurs qui ont toujours confiance en moi, et qui m'ont encouragé et soutenu durant tous les moments difficiles de thèse.

Enfin, un remerciement très particulier à celui qui m'a donné le courage pour surmonter les moments difficiles durant cette thèse, pour son soutien et sa confiance.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

4

Chapitre I : CHAPITRE INTRODUCTIF ET ETAT DE L'ART

1 CHAINES LOGISTIQUES : DEFINITIONS, ACTIVITES ET PROBLEMES	13
1.1 Introduction.....	13
1.2 Les activités d'une chaîne logistique générale.....	14
1.3 Les problèmes liés au fonctionnement des chaînes logistiques.....	15
2 ENTREPRISES VIRTUELLES ET ENTREPRISES ETENDUES	19
2.1 L'entreprise étendue	19
2.2 L'entreprise virtuelle.....	20
3 CONCEPTS LIES AU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAINE LOGISTIQUE.....	21
3.1 Caractérisation des chaînes logistiques	21
3.2 La prise de décisions opérationnelles dans les chaînes logistiques.....	22
3.3 La coordination au sein des chaînes logistiques: définition et état de l'art.....	24
3.4 Quelques outils pour la coordination au sein d'une chaîne logistique	27
3.5 Planification	30
4 MODELISATION DES CHAINES LOGISTIQUES.....	31
4.1 Introduction.....	31
4.2 Les systèmes multi-agents	32
4.3 La modélisation des chaînes logistiques par les systèmes multi agents : état de l'art	37
5 LES MODELES DE PLANIFICATION DE LA PRODUCTION AU SEIN DES ENTREPRISES VIRTUELLES.....	41
5.1 Introduction.....	41
5.2 La planification centralisée par des extensions des méthodes MRP	41
5.3 La planification distribuée	42
6 POSITIONNEMENT DE NOTRE PROBLEME.....	44

Chapitre II : ARCHITECTURE ET OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LA PLANIFICATION DE L'ENTREPRISE VIRTUELLE

1 INTRODUCTION	49
2 ARCHITECTURE GLOBALE DE L'ENTREPRISE VIRTUELLE.....	49
2.1 Caractéristiques de l'entreprise virtuelle	49
2.2 Hypothèses, notations et modèles de fonctionnement adoptés.....	51
2.3 Position du problème de la planification de l'EV	62

3 PROBLEMES ET MODES DE FONCTIONNEMENT D'UN NEV	62
3.1 Problèmes de construction de plannings d'un NEV	62
3.2 Les modes de planification d'un NEV	63
3.3 Les modèles d'établissement de plannings pour un NEV selon le mode de sollicitation	67
4 LA COORDINATION DES NEV D'UN MEME NIVEAU	71
4.1 Les problèmes des NEV de même niveau	71
4.2 Outils d'aide au choix des plannings optimaux pour un niveau.....	76
5 RECHERCHE GLOBALE SEMI-DISTRIBUEE D'UN ENSEMBLE DE PLANNINGS	
COHERENTS	80
5.1 Approche itérative semi-distribuée	80
5.2 Description de l'algorithme de supervision	81
5.3 Liens avec les autres outils de décision	86
6 CONSTRUCTION D'UNE SOLUTION PLANIFIEE AU MOYEN D'UN ALGORITHME	
GENETIQUE POUR UN NEV.....	87
6.1 Introduction.....	87
6.2 Hypothèses du problème de planification à résoudre	88
6.3 Principes de l'algorithme génétique utilisé par l'AP	90
6.4 La génération d'une solution approchée de type planning rétrograde à partir d'un chromosome	95
7 CONCLUSION	99

Chapitre III : L'ARCHITECTURE INFORMATIQUE DE L'EV A BASE DES SYSTEMES MULTI AGENTS

1 INTRODUCTION	105
2 MODELISATION DE L'EV PAR UN SYSTEME MULTI-AGENTS	105
2.1 Architecture globale de l'EV.....	105
2.2 Description des différents agents constituant l'architecture proposée	107
3 DESCRIPTION DETAILLEE DES FONCTIONNALITES DES DIFFERENTS AGENTS	112
3.1 Agent Planificateur du NEV (AP)	112
3.2 Agent Négociateur du NEV (AN).....	113
3.3 Agent Négociateur de Niveau et Agent Médiateur.....	113
4 LES FLUX ECHANGES AU SEIN DE L'EV.....	114
4.1 Les flux d'information.....	114
4.2 Les flux de matières	116
5 LA NEGOCIATION AU SEIN DE L'EV.....	116
5.1 Hypothèses sur les processus de négociation	117
5.2 La négociation inter niveaux.....	118
5.3 La négociation intra-niveau	122
5.4 La négociation au sein du NEV	123

6 MODELISATION PAR LES STATECHARTS DES DIFFERENTS AGENTS	126
6.1 Introduction.....	126
6.2 Statechart de l'Agent Planificateur.....	126
6.3 Statechart de l'Agent Négociateur.....	127
6.4 Statechart de l'Agent Négociateur de niveau	129
7 LA MEDIATION AU SEIN DE L'EV	131
7.1 Introduction.....	131
7.2 Les principaux états du MA.....	131
8 CONCLUSION	132

<i>CONCLUSIONS & PERSPERCTIVES</i>	<i>135</i>
--	------------

<i>LISTE DES TABLES ET FIGURES.....</i>	<i>140</i>
---	------------

<i>BIBLIOGRAPHIE.....</i>	<i>143</i>
---------------------------	------------

<i>LISTE DES PUBLICATIONS</i>	
-------------------------------	--

<i>ANNEXES</i>	
----------------	--

INTRODUCTION

1 Introduction

L'environnement socio-économique dans lequel évoluent les entreprises industrielles a connu des changements majeurs ces dernières années. Dans le passé, la production était essentiellement effectuée dans des usines autonomes qui étaient organisées localement et limitaient leurs interactions avec des entreprises externes principalement sur le plan de leurs approvisionnements. De nos jours, avec le développement rapide des moyens de transport et de communication, on assiste à un processus d'expansion qui se manifeste à l'échelle des pays et des continents. Ce développement a donné naissance à la création de marchés et de systèmes de fabrication globaux. De plus, l'ouverture des marchés oblige les entreprises à fonctionner dans des conditions concurrentielles. Elles doivent satisfaire leurs clients et en même temps se comporter comme des fournisseurs fiables. Ainsi, les entreprises s'organisent en réseaux de différentes usines, de centres logistiques et d'entrepôts. Leur objectif est d'établir des relations de partenariat et de coopération entre elles, ce qui leur permet de résister sur le marché.

Dans ce contexte se sont développés les concepts de chaînes logistiques (à l'exemple de Hewlett Packard et Digital Equipment Corporation), des entreprises réseaux, des entreprises étendues ou encore des entreprises virtuelles. Dans la littérature, plusieurs définitions ont été données pour caractériser chacun de ces concepts. Dans cette étude, nous avons retenu les définitions suivantes :

- Traditionnellement, une chaîne logistique (CL) peut être définie comme un réseau d'entreprises composé de plusieurs nœuds dans lequel circulent des flux physiques et d'informations des fournisseurs vers des clients. Les nœuds de la CL peuvent être soit des fournisseurs de matières premières ou de composants, des unités de fabrication, des entrepôts, des aires de stockage, des usines d'assemblage, des moyens de transport, des distributeurs de produits finis, des détaillants et des clients.

- L'entreprise étendue (EE) est un cas particulier de chaîne logistique, caractérisée par l'existence d'un leader de la chaîne ou donneur d'ordres. Il constitue le nœud central d'assemblage final approvisionné par les fournisseurs (de 1^{er} niveau, 2^{ème} niveau...). Il est servi par des unités de recherche, de support, de ventes, des banques... L'idée est de fournir le nœud central en composants, compétences et savoir faire nécessaires au bon moment. Les flux de matières sont en général optimisés en mode juste à temps. C'est le cas de l'industrie automobile, l'industrie aérospatiale, l'industrie navale, l'industrie des semi conducteurs....

- L'entreprise virtuelle (EV) est une forme d'organisation plus dynamique et moins stable qu'une entreprise étendue (c'est-à-dire que la configuration du réseau peut facilement changer). En fait, le principe de base est d'utiliser des compétences, des facilités ou des services provenant de plusieurs entreprises sans qu'un nœud du réseau ne joue un rôle leader. Il s'agit d'un cluster ou d'une association temporaire de plusieurs entités de production (nouvelles ou existantes) appartenant à plusieurs entreprises et qui forme une super-entité pouvant satisfaire de façon opportuniste un besoin du marché. Un exemple d'EV peut être l'entreprise qui a construit le Tunnel sous la Manche en Europe ou l'alliance Sky Team dans le transport aérien organisé autour d'Air France et Delta.

- l'entreprise réseau est caractérisée par un système de contrôle distribué, les processus métier partagés et par l'existence de plusieurs producteurs et consommateurs au sein d'une chaîne logistique partageant les informations et les connaissances. Les objectifs principaux de cette structure sont l'optimisation des opérations via la co-décision, la coordination et les mécanismes de négociation. L'avantage principal d'une entreprise réseau est sa structure flexible (plusieurs nœuds peuvent être ajoutés ou supprimés du réseau). Ce qui la rend plus réactive face aux changements des conditions économiques ou pour l'implémentation de nouvelles stratégies de métier "business".

La bonne gestion des chaînes logistiques reste de nos jours une problématique ouverte. En effet, vu les différentes sources d'incertitudes en terme de variations de la demande des clients, les tendances du marché, les aléas au niveau des moyens de la production et les aléas au niveau des moyens du transport..., la mise en place d'un système de prise de décision (automatique, semi automatique ou humain) pour la gestion des chaînes logistiques n'est pas une question simple à résoudre. Le rôle du tel système d'aide à la décision est de permettre aux donneurs d'ordres de faire des choix en tenant compte de plusieurs objectifs souvent antagonistes comme l'amélioration du service et de la qualité, la réduction des coûts et la minimisation des stocks et ce, dans des conditions aléatoires.

Pour la gestion des chaînes logistiques, nous pouvons regrouper les décisions en trois classes, selon le niveau de prise de décision :

- Les décisions stratégiques, qui sont prises au plus haut niveau de la chaîne. Elles concernent les décisions à long terme de la chaîne.

- Les décisions tactiques, qui sont destinées à obtenir la meilleure efficacité des moyens mis en oeuvre. Elles sont généralement des décisions à moyen terme.

- Les décisions opérationnelles, qui portent sur le court terme et consistent à organiser dans le temps et sur les moyens nécessaires les différentes opérations à effectuer de manière à respecter les décisions des deux niveaux supérieurs.

D'autres questions se posent concernant les protocoles de prise de décision tels que « qui va prendre les décisions ? », « Comment instaurer un système de prise de décision ? »...

Dans le cas de l'approche EE, le schéma décisionnel est généralement centralisé autour du donneur d'ordres (DO). Ceci peut générer des coûts de stocks importants et une dépendance entre le DO et ses fournisseurs. Par conséquent, si une crise survient chez le DO elle se propage directement sur toute la chaîne. De ce fait, on constate actuellement une sorte de migration de l'entreprise étendue (EE) vers l'entreprise virtuelle (EV) où la décision est concertée.

C'est dans cette vision que le projet européen Growth "V-CHAIN" a été lancé au départ et co-financé par la Communauté Européenne. Dans le cadre de ce projet, "FORD" et "APRILIA" ont décidé de faire participer leurs fournisseurs dans la prise de décision et ont demandé à plusieurs partenaires universitaires dont l'équipe "MACSI-INRIA" de proposer des outils de migration d'une entreprise étendue vers une entreprise virtuelle et des outils d'aide à la décision au sein d'une entreprise virtuelle. C'est ainsi que ce travail a été proposé et vise à étudier :

- Les relations qu'il faut instaurer entre les différents partenaires de la chaîne pour assurer leur coordination et faire réussir une structure d'entreprise virtuelle.
- Quels outils d'aide à la décision faut-il mettre en place pour assurer une bonne gestion au niveau opérationnelle de la chaîne.
- Comment assurer une synchronisation des flux interentreprises pour la réussite d'une planification collaborée.

Au niveau opérationnel, La planification consiste à concevoir pour la chaîne un "futur souhaitable" et les moyens nécessaires pour parvenir à sa réalisation. C'est une activité de choix parmi plusieurs possibilités. En fait, la définition du niveau opérationnel diffère d'une étude à une autre. Généralement, "une opération" est l'action élémentaire pour tout travail ou tâche. Ce qui veut dire que le niveau opérationnel pour la gestion de la production est l'ordonnancement des tâches sur les machines, ce qui n'est pas notre cas. A notre définition du niveau opérationnel, la planification vise une programmation prévisionnelle, sur un horizon glissant de planification, de la production,

des approvisionnements et de la distribution à partir d'une demande commerciale prévue ou réelle en conformité avec les objectifs et les décisions effectuées aux niveaux supérieurs.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de présenter des propositions, des outils et des méthodes permettant aux partenaires d'une chaîne logistique voulant se structurer en entreprise virtuelle de mieux coordonner leurs activités de planification de la production et de la distribution. Elle propose une architecture informatique utilisant la négociation et la médiation qui seront la base des arrangements et des compromis pour la planification co-décidée des différents partenaires.

Le **chapitre I** présente une analyse bibliographique sur les chaînes logistiques et les entreprises virtuelles. Après avoir rappelé leurs définitions, l'étude s'intéresse aux concepts liés au fonctionnement des chaînes logistiques et les problèmes de leur gestion.

Dans un second temps, une présentation d'un état de l'art sur la modélisation, la coordination et la planification de la production au sein des chaînes logistiques et des entreprises virtuelles est effectuée.

A l'issue de cette étude bibliographique, nous présentons l'environnement et les suppositions sous lesquelles nous avons faits notre étude. La démarche adoptée est basée à la fois sur une description de l'architecture globale de l'entreprise virtuelle, les outils d'aide à la décision et les formalismes de coordination qui pilotent les flux interentreprises.

Le **chapitre II** constitue le cœur de notre travail, il développe par étapes comment aboutir un planning faisable et quasi optimal d'un ensemble d'entreprises structurées en entreprise virtuelle. Etant dans un cadre de partenariat, les entreprises se partagent les différents flux d'informations et de produits.

Dans un premier temps, cette étude aboutit à la proposition d'une architecture de l'entreprise virtuelle par niveaux, ce qui permet de ne contrôler que la cohérence sur chaque niveau de l'EV. Ensuite un ensemble d'outils de prise de décision pouvant assister les décideurs de chaque nœud et les décideurs du niveau sont détaillés. Pour assurer des plannings cohérents de tous les niveaux, nous proposons une approche tantôt centralisée et tantôt distribuée pour la planification de la production. L'approche distribuée est assurée par une co-décision par négociation des délais et des coûts entre les différents niveaux de l'entreprise virtuelle, tandis que l'approche centralisée est assurée par un médiateur dans le cas de non convergence des négociations entre deux ou plusieurs niveaux.

Afin d'illustrer les techniques de planification que peut utiliser un nœud, nous avons proposé un exemple d'algorithme génétique pour la construction d'un planning pour un nœud.

Le **chapitre III** s'intéresse à la modélisation de l'architecture informatique de l'entreprise virtuelle en utilisant les systèmes multi-agents. Une description détaillée des fonctionnalités des agents qui constituent l'architecture est présentée. L'accent est mis sur la formalisation de la négociation et la médiation entre agents, qui se partagent différents messages et données, en spécifiant le contenu de chaque message.

Etant un outil de modélisation des systèmes à événements discrets, une modélisation des comportements des différents agents par les Stactecharts est développée. Ce qui permet de décrire les différents états (décisions) pris par chaque agent en fonction de l'environnement dans lequel il sera soumis. Nous distinguerons des états de communication simples et des états de négociations au sein d'un même niveau et entre deux niveaux différents.

Et enfin, nous terminerons par une conclusion et les perspectives de notre travail.

Chapitre I

Chapitre Introductif et Etat de l'Art

1 CHAINES LOGISTIQUES : DEFINITIONS, ACTIVITES ET PROBLEMES.....	13
1.1 Introduction	13
1.2 Les activités d'une chaîne logistique générale	14
1.3 Les problèmes liés au fonctionnement des chaînes logistiques	15
2 ENTREPRISES VIRTUELLES ET ENTREPRISES ETENDUES	19
2.1 L'entreprise étendue.....	19
2.2 L'entreprise virtuelle.....	20
3 CONCEPTS LIES AU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAINE LOGISTIQUE	21
3.1 Caractérisation des chaînes logistiques.....	21
3.2 La prise de décisions opérationnelles dans les chaînes logistiques	22
3.2.1 Les objets de décision	22
3.2.2 Les décideurs et les outils d'aide à la décision	23
3.2.3 La décision et les supports de connaissances	23
3.2.4 La structure des systèmes de décision	23
3.3 La coordination au sein des chaînes logistiques : définitions et état de l'art.....	24
3.3.1 Coordination production/distribution	24
3.3.2 Coordination stock-distribution.....	25
3.3.3 Coordination production-stock.....	26
3.3.4 Coordination client/fournisseur.....	26
3.4 Quelques outils pour la coordination au sein d'une chaîne logistique	27
3.4.1 Les contrats	27
3.4.2 Le partage de l'information.....	28
3.4.3 Les règles de jeu gagnant-gagnant	29
3.5 Planification	30
4 MODELISATION DES CHAINES LOGISTIQUES.....	31
4.1 Introduction	31
4.2 Les systèmes multi-agents	32
4.2.1 La notion d'agent	32
4.2.2 Définition des systèmes multi agents	32
4.2.3 Coopération inter agents.....	33
4.2.4 Les modèles de la coopération des agents	34
4.2.5 Résolution des conflits entre agents par coordination	34
4.2.6 Les protocoles de négociation	35
4.3 La modélisation des chaînes logistiques par les systèmes multi agents : état de l'art.....	37
5 LES MODELES DE PLANIFICATION DE LA PRODUCTION AU SEIN DES ENTREPRISES VIRTUELLES	41

5.1 Introduction	41
5.2 La planification centralisée par des extensions des méthodes MRP	41
5.3 La planification distribuée	42
6 POSITIONNEMENT DE NOTRE PROBLEME	44

1 Chaînes logistiques : définitions, activités et problèmes

1.1 Introduction

Avec l'évolution actuelle de l'économie mondiale, chaque entreprise se concentre de plus en plus sur la production de produits à haute valeur ajoutée afin de satisfaire ses clients en terme de coûts, qualité et délais de livraison. Ayant besoin de plusieurs fournisseurs, les entreprises sont conscientes que pour atteindre leurs objectifs, un effort local concernant l'amélioration des moyens de production et la réalisation de bons plannings de production ne suffit pas, mais qu'il faut améliorer aussi les systèmes d'approvisionnements et de distribution.

Dans ce contexte, la notion de chaînes logistiques s'est retrouvée projetée au premier plan. Lee et Billington [Lee et Billington 93] ont donné une définition de la chaîne logistique *d'un produit fini* comme étant un réseau d'installations assurant les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client.

A partir de cette définition, ainsi que d'autres qui se trouvent dans la littérature [Lin et Shaw01], on peut résumer l'ensemble des définitions de la chaîne logistique comme un réseau d'entreprises de production, de transport et de distribution où n'interviennent pas les clients finaux ni les fournisseurs de matières premières et où les flux de produits et les flux d'informations sont de sens opposés. Le réseau assure la production, la distribution, le stockage des produits finis, semi finis et composants (Figure I-1).

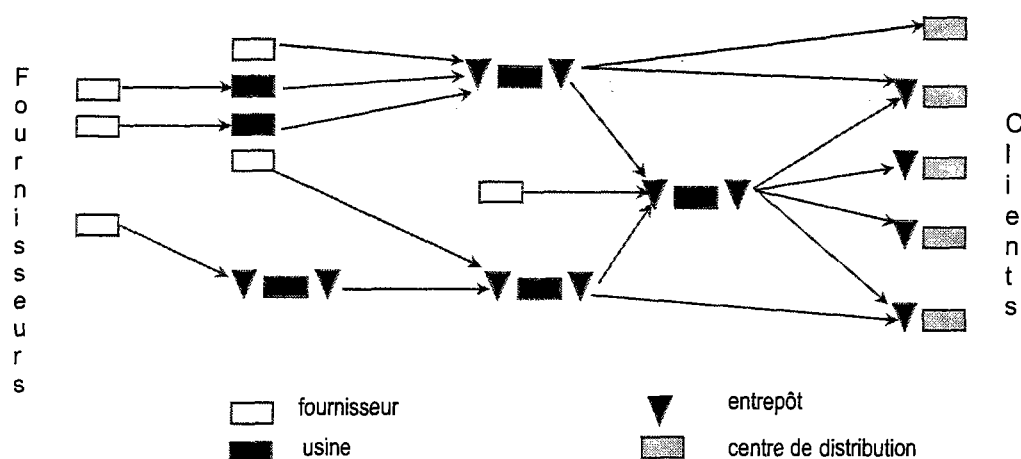


Figure I-1. Exemple de chaîne logistique

L'objectif est de produire les quantités juste nécessaires avec la qualité demandée et dans les délais prévus. Les donneurs d'ordres de la chaîne ont ainsi essayé d'appliquer la philosophie du Juste A Temps (JAT). Avec le JAT limité aux donneurs d'ordres, les fournisseurs étaient dans l'obligation de travailler en flux tendus et d'avoir des stocks pour satisfaire les commandes de dernière minute de leurs clients. Les fournisseurs des fournisseurs ont le même problème et ainsi de suite jusqu'au fournisseur initial, ce qui peut à la limite mettre en cause le juste à temps du donneur d'ordres (cas du délai qui se répercute et s'amplifie tout au long de la chaîne). En cas de grandes fluctuations dans les demandes, le vrai juste à temps peut être défini comme la coordination entre les différentes entités de la chaîne pour produire, distribuer et stocker aussi juste que nécessaire tout le long de la chaîne.

1.2 Les activités d'une chaîne logistique générale

Parmi les principales fonctions des chaînes logistiques, nous distinguons :

- L'approvisionnement : Celui-ci constitue un moyen potentiel pour améliorer la qualité des produits fabriqués en réduisant leurs coûts et par conséquent leurs prix. Les matières et les composants approvisionnés constituent 60% à 70% de coûts des produits fabriqués dans presque toutes les entreprises. Les délais de livraison des fournisseurs et la fiabilité de la distribution influent plus que le temps de production sur le niveau de stock ainsi que le niveau de service de chaque fabricant [Harmon 92]. Les clients ont ainsi consolidé les relations client / fournisseur et sont passés des modes du type marchandage ou gagnant-perdant vers le mode gagnant - gagnant.

- La distribution et le transport : Au niveau des chaînes logistiques, les problèmes de distribution et de transport sont vus sous plusieurs angles. Certaines recherches ont étudié le problème de cheminement des véhicules au sein de la chaîne en essayant d'optimiser les circuits (ou routages) qu'ils peuvent suivre, d'autres se sont concentrés sur les moyens de transport qui optimisent la distribution. D'autres s'intéressaient aux quantités des produits qui doivent être distribués sur les clients et quelle est la stratégie minimisant les coûts de transport et de stockage sur l'ensemble de la chaîne.

- La production : Il s'agit des unités de fabrication ou d'assemblage des produits semi-finis puis des produits finis.

- Le stockage : Un certain nombre d'entrepôts ou de zones de stockage peuvent être nécessaires le long de la chaîne pour donner de la souplesse et du « mou » dans la production. Chez PSA, on parle de « poumons » en parlant de stock pour faire « respirer » la production.

- Les ventes : Il s'agit d'unités de distribution ou de ventes des produits.

1.3 Les problèmes liés au fonctionnement des chaînes logistiques

Sur les plans stratégique, tactique et opérationnel, la gestion des chaînes logistiques reste encore complexe du fait de plusieurs problèmes. [Lee et Billington 92] ont étudié ces différents problèmes et ont relevé quatorze pièges, que nous jugeons encore valables pour la plupart, qui peuvent limiter son bon fonctionnement, à savoir:

1- Absence d'indicateurs de performance globaux de chaîne logistique : bien que le fonctionnement global de la chaîne dépend du fonctionnement des différentes entités composant la chaîne, chaque entité est habituellement gérée d'une façon autonome, et par conséquent, certains objectifs locaux peuvent être en conflit avec l'objectif global de toute la chaîne. Un dilemme usuel concerne les niveaux de stock. Par exemple, si l'objectif local d'une entité est la minimisation des stocks, et si l'objectif global de la chaîne est mesuré par la satisfaction du client alors cette entité doit "souffrir" pour satisfaire cet objectif global. Les indicateurs de performance devraient donc tout aussi bien inclure des mesures pour la chaîne logistique entière que des mesures locales.

2- Définition insuffisante du service client : actuellement le critère de performance le plus général est le taux de satisfaction des clients. Cependant, il y a différentes définitions de satisfaction de clients, telles que le pourcentage des articles livrés avant les dates prévues par le client, le pourcentage des commandes exécutées et livrées avant les dates prévues par le client, le degré de retard d'une commande, le délai, ou le temps de réponse. L'adéquation de chacun de ces derniers critères dépend des circonstances. Par exemple, si une commande doit simplement compléter le niveau des stocks, le fournisseur peut envoyer différents articles par petits lots. Si, au contraire, le client a besoin de la commande complète pour lancer la production alors le taux de satisfaction devrait être mesuré en terme de commandes totalement livrées.

3- Données insuffisantes concernant la livraison : quand les clients passent des commandes, ils veulent savoir quand est ce qu'ils seront livrés. Beaucoup d'entreprises donnent des temps de réponse standard qui ne correspondent pas à la réalité. De plus, elles ne sont pas toujours capables

de mettre à jour les dates de livraison en cas de changements pendant le cycle de production de la commande.

4- Systèmes d'information inefficaces : la recherche manuelle de l'information peut devenir un processus manuel pénible si les différents systèmes d'information ne sont pas reliés ; on peut espérer que les ERP¹ apportent une amélioration à ce problème. Ceci présente une difficulté pour les fournisseurs de donner des dates précises de livraison (comme pour le piège 3).

5- Ignorance de l'impact des incertitudes : plusieurs sources d'incertitude peuvent influencer le bon fonctionnement de la chaîne logistique. Afin de réduire l'impact de ces incertitudes, les responsables de la chaîne doivent comprendre les sources d'incertitudes et l'importance de leur impact, et puis coordonner de manière à les réduire ou les éliminer. Par exemple, avant de commencer à modifier les politiques de stockage des pièces approvisionnées de l'extérieur, on devrait se concentrer sur les manières d'améliorer les délais de livraison des fournisseurs.

6- Politiques de stockage simplistes : des politiques de stockage doivent être différenciées entre les pièces (selon la fiabilité du fournisseur, la stabilité dans la demande, et la criticité de la pièce) et doivent être périodiquement ajustées pour tenir compte des changements.

7- Discrimination contre les clients internes : une entité dans une organisation peut être fournisseur des clients internes et externes. Le service client pour les clients internes est garanti et connu alors que les clients externes apportent de vrais revenus et sont ainsi plus intéressants et apparaissent plus valables. Appliquer cette priorité augmente les effets d'incertitude du client interne et peut affecter la rentabilité globale des entreprises partenaires.

8- Coordination faible : en l'absence d'une bonne coordination, un fournisseur peut être obligé de faire des stocks très élevés en produits finis. Les coûts de ces niveaux de stock seront payés par le client. De plus, sans coordination le fournisseur peut utiliser des moyens de transport coûteux pour livrer ses clients.

9- Analyse incomplète des moyens de transport : un compromis entre le niveau de stock et les coûts de transport doit être bien analysé. Par exemple, les coûts de rupture de livraison par l'utilisation des moyens de transport plus lents ou moins fréquents pourraient augmenter des investissements en stocks.

¹ ERP : Enterprise Resource Planning ou logiciels de gestion intégrée

10- Évaluation incorrecte des coûts de stock : l'évaluation des coûts de stock devrait considérer des coûts d'opportunité perdus, des coûts d'entreposage et de stockage, et des coûts d'obsolescence (dus aux cycles de vie courts ou à des changements techniques qu'on peut rencontrer).

11- Définition des limites des organisations : une entreprise peut avoir une structure d'organisation décentralisée, chaque organisation ayant ses propres critères de performance. Parfois les entités d'une chaîne logistique appartiennent à d'autres chaînes logistiques. Les limites pourraient avoir comme conséquence la réticence d'investir des ressources qui pourraient servir à la concurrence. Le fournisseur pourrait avoir des délais incertains de la livraison qui oblige ses clients à garder un niveau élevé de stock en composants (surtout s'il s'agit d'un fournisseur de produits critiques). Cependant, l'investissement en stock global dans la chaîne logistique pourrait être réduit si les fournisseurs étaient prêts à réduire la durée de cycle des produits ou à changer le niveau du stock des produits semi-finis ou finis.

12- La conception du Produit-Processus qui ne prend pas en considération la chaîne logistique : un produit peut être conçu de telle manière que des options spécifiques pour chaque client puissent être ajoutés à l'étape finale, ou même par le client. Les fluctuations dans la demande des produits semi-finis génériques sont moins importantes que celles des différents produits spécifiés par le client. Ainsi, le niveau de service client, les coûts et les délais peuvent être améliorés s'il y a une différenciation des produits retardés et une standardisation de composants (exemple du *mass customization*).

13- Séparation entre la conception de la chaîne logistique et des décisions opérationnelles : des décisions d'ouvrir ou fermer une usine ou un centre de distribution sont souvent basées sur des coûts fixes (par exemple, des coûts de transport fixes). Or les changements de la structure du réseau ont un effet sur l'efficacité des facteurs opérationnels, tels que des investissements en stocks et le temps de réponse des commandes qui devraient également être considérés.

14- Chaîne logistique incomplète : aller au delà de la chaîne logistique interne en intégrant les fournisseurs et les clients externes fournit souvent de nouvelles possibilités pour améliorer les opérations internes. En comprenant mieux le client du client, on peut mettre en place un système de contrôle du stock plus efficace et cibler les priorités globales de toute la chaîne.

Du fait de la difficulté de l'étude et de la grande dimension du sujet, ces problèmes n'ont jamais été traités dans la littérature d'une façon globale. Pour en trouver des solutions, nous jugeons intéressant de garder à l'esprit les éléments suivants

Au niveau stratégique, il ne suffit pas de re-développer une gestion interne à chaque entreprise mais de définir de nouvelles relations de partenariat entre clients et fournisseurs. La réussite de chaque entreprise au sein de la chaîne logistique dépend aussi de sa capacité à établir des relations durables, à s'intégrer et à coordonner ses décisions avec celles de ses partenaires pour faire face à un marché en plein mouvement et où les aléas et les perturbations sont fréquents et importants.

Au niveau tactique et opérationnel, il est judicieux d'assurer :

- Une coordination de l'ensemble des acteurs et des fonctions constituant la chaîne logistique et la synchronisation des flux de produits et d'informations,
- Une intégration des systèmes d'informations des différents partenaires, en utilisant les opportunités des nouvelles technologies de communication et d'information (TIC),
- Un suivi des évolutions du marché en assurant une agilité de la production et des moyens de distribution,
- Une prise de décision concertée sur l'ensemble de la chaîne où tous les acteurs de la chaîne peuvent intervenir pour la prise de décision.

Actuellement, les relations entre entreprises se sont développées et ont migré vers des relations d'intégration, de coopération et de codécision. Ce qui a donné naissance aux entreprises étendues (EE) et aux entreprises virtuelles (EV). Celles-ci ont mis en valeur les flux interentreprises par une utilisation de plus en plus avancée. Et par conséquent, d'autres problèmes sont apparus, comme par exemple :

- ✓ Compte tenu de leur aspect distribué ou réparti, comment assurer une coordination globale pour la totalité d'une EE ou d'une EV?
- ✓ Qui prend les décisions parmi l'ensemble des partenaires ?
- ✓ Quels sont les outils et les mécanismes qui vont assurer une prise de décisions cohérentes?

- ✓ Comment assurer une bonne gestion de la chaîne logistique en général sous les nouvelles conditions imposées par la globalisation et les nouvelles lois de la concurrence ?

2 Entreprises virtuelles et entreprises étendues

2.1 L'entreprise étendue

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs définitions de l'entreprise étendue (EE) ce qui s'explique par les différents champs d'application concernés et l'évolution continue de cette notion. [Browne *et al.* 95] ont défini l'entreprise étendue comme étant une organisation ou une forme d'entreprise représentée en tout ou en partie par les clients, les fournisseurs et les sous traitants engagés d'une façon collaborative pour la conception, le développement, la production et la livraison de produits pour des utilisateurs finaux. A cette définition, [Martinez *et al* 01] ont ajouté quelques caractéristiques telles que :

- Le gestionnaire de l'entreprise étendue développe des relations de partenariat à long terme avec des clients potentiels. Il les traite comme d'importants partenaires.
- L'entreprise se concentre plus sur ses compétences en business et ses activités techniques et sous-traite tout ce qui sort de ses compétences à des fournisseurs externes ou à des prestataires de services. L'EE s'intéresse plus à produire des produits standard ou semi standard avec des options et des variantes.
- Une plate-forme de méthode, de processus métier et de technologies est à la base des activités, dépassant ainsi les limites des réseaux traditionnels d'entreprises.

L'entreprise étendue peut être schématisée comme indiqué sur la Figure I-2.

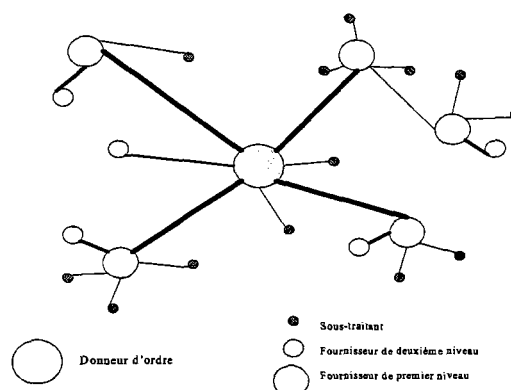


Figure I-2. Exemple d'entreprise étendue

2.2 L'entreprise virtuelle

Dans le cadre du projet européen V-CHAIN, dont l'équipe MACSI de l'INRIA était un des partenaires, l'entreprise virtuelle (VE) est considérée comme une évolution de l'entreprise étendue dans laquelle les partenaires essaient d'établir des relations de plus en plus décentralisées pour la gestion de l'information, des décisions et des flux de produits (Figure I-3).

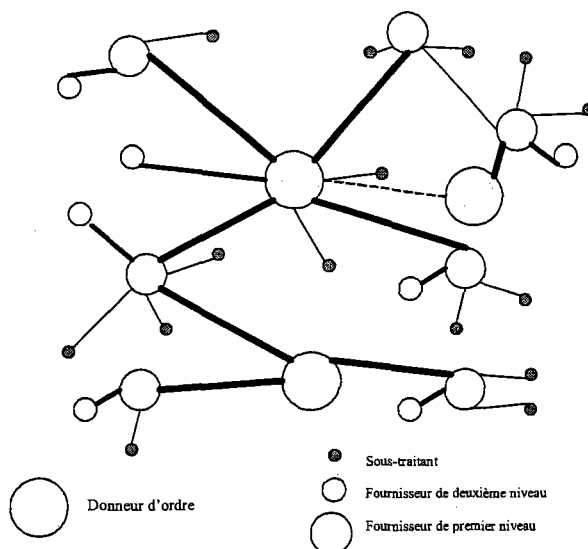


Figure I-3 .Exemple d'entreprise virtuelle

Une différence essentielle entre entreprise étendue et entreprise virtuelle tient dans le fait que dans l'entreprise étendue un nœud du réseau d'entreprise constitue le pivot, c'est généralement un grand donneur d'ordres (comme une usine d'assemblage terminal – exemple de l'industrie automobile) alors que dans l'entreprise virtuelle il peut y avoir plusieurs donneurs d'ordres partageant les mêmes fournisseurs et/ou unités de fabrication. Une autre différence notable est que l'entreprise étendue a une structure plus stable, plus pérenne, que l'entreprise virtuelle qui est une association temporaire et évolutive d'entreprises pour répondre à un besoin ponctuel du marché (exemple : construction du Tunnel sous la Manche).

C'est cette définition que nous retenons dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, il existe de nombreuses autres définitions des entreprises virtuelles dont nous rappelons les principales ci-dessous.

[Makastoris *et al.* 96] ont défini l'entreprise virtuelle comme un ensemble d'unités et de processus au sein d'un réseau de type chaîne logistique, se composant d'un ensemble d'unités de production coopérant entre elles, de magasins et d'unités de transport ; qui se comportent comme une entreprise simple avec la coordination forte et la coopération pour atteindre des buts mutualisés.

[Camarinha-Matos et Afsarmanesh 03] ont ajouté que la réussite de l'entreprise virtuelle dépend du niveau de technologie utilisée et des systèmes d'information afin d'assurer l'intégration des différents partenaires pendant une courte période. Les partenaires d'une EV partagent les coûts, les qualifications et les compétences propres à chacun ce qui va leur permettre l'accès aux marchés globaux tout en leur assurant un bénéfice plus important que ce que peut atteindre chacun des partenaires individuellement.

[Martinez *et al.* 01] ajoutent qu'une évolution possible d'une collaboration à long terme d'une EV dépend du partenariat garantissant un haut niveau de flexibilité. La compétition entre partenaires doit être efficace pour garantir des fonctions et des ressources prometteuses dont la clé est la flexibilité (agilité), la robustesse et la réactivité. La structure d'une EV est liée en général à la durée du projet, on distingue ainsi la structure de l'EV à court terme et l'EV à long terme, ou ce qu'on appelle encore « Consortium VE ».

A la différence de l'entreprise étendue où le contrôle est purement hiérarchique, dans le cas de l'entreprise virtuelle le contrôle est non hiérarchique et, dans certains cas, il est possible de trouver un coordinateur qui coordonne les tâches uniquement dans le cas des conflits.

Notons enfin que dans la littérature on trouve aussi les notions d'entreprise réseau ou d'architecture industrielle comme étant des structures d'entreprises basées sur la collaboration et la décentralisation des responsabilités [Poulin *et al.* 94].

3 Concepts liés au fonctionnement d'une chaîne logistique

3.1 Caractérisation des chaînes logistiques

Comme [Butera 91], [Poulin *et al.* 94] ont caractérisé une entreprise réseau. De même, nous pouvons caractériser une entreprise virtuelle en se basant sur ses composants principaux :

- ✓ les nœuds : sont les installations ou entreprises ou unités de production, de transport ou de stockage qui sont capables de coopérer entre elles.

- ✓ les liens ou les arcs : qui opèrent la synergie entre les différents nœuds, ils peuvent être de nature différente.
- ✓ la structure : correspond à la façon dont les différentes unités composant la chaîne logistique sont organisées. On distingue la structure série, la structure arborescente, la structure d'assemblage et la structure générale n'imposant aucune propriété spécifique [Rota 98].
- ✓ les propriétés fonctionnelles régissant le fonctionnement de la chaîne logistique : elles correspondent aux systèmes de gestion, aux règles de jeu partagées, aux modes de communication et de transfert de l'information... Leur conception a nécessité l'analyse fine du ou des systèmes de décision sous-jacents à la chaîne logistique.

Dans la suite nous nous intéressons aux aspects liens entre les différents nœuds et aux propriétés fonctionnelles régissant le fonctionnement de la chaîne.

3.2 La prise de décisions opérationnelles dans les chaînes logistiques

3.2.1 Les objets de décision

Nous définissons la décision comme étant le problème qui consiste à affecter une valeur à une variable qu'on ne connaît pas et dont la connaissance permet au décideur de sortir d'une situation de jugement ou d'incertitude. Dans le cadre des chaînes logistiques, les entreprises ont besoin à tout moment de prendre des décisions de plus en plus adéquates pour répondre à tous les problèmes rencontrés. Du point de vue opérationnel, on distingue plusieurs objets de la décision au niveau d'une entreprise, à savoir :

- Les décisions capacitaires ou modales : elles concernent la manière de changer la capacité au sein d'une chaîne logistique. A tout moment, l'entreprise doit décider de l'utilisation ou pas des heures supplémentaires, de la sous-traitance...
- Les décisions de variation du système de production : elles concernent le dimensionnement momentané des capacités. Dans certaines périodes, l'entreprise doit décider si elle travaille en 2x8 ou en 3x8... Dans ce cadre, on ne revient pas sur les machines mais sur leur utilisation.
- Les décisions de planning : ce sont en fait les vraies décisions opérationnelles. Elles doivent porter sur les quantités à produire, à stocker ou à transporter vers les clients ou vers les entrepôts.

3.2.2 Les décideurs et les outils d'aide à la décision

Afin de prendre les décisions adéquates, on peut distinguer plusieurs acteurs ou preneurs de décisions.

- Décisions humaines directes : à partir de son expérience et peut être des historiques, l'Homme affirme que tel objet de la décision prend telle valeur.
- Décisions humaines semi directes : dans ce cas, il y a possibilité d'essais, de tests et de calibrage de paramètres avant le choix de ces derniers et la décision enfin.
- Décisions de pilotage : dans ce cas de figure, la décision est confiée à un outil ou un système d'aide à la prise de décision.

A chaque décideur, on peut associer un ou plusieurs objets ou noyaux de décision dont il sera responsable. Quant aux outils d'aide à la décision, on peut citer les outils de la recherche opérationnelle tels que la programmation linéaire, la programmation dynamique et les méthodes heuristiques ou approchées (algorithmes génétiques, recuit simulé...), la théorie de la décision et les outils d'intelligence artificielle.

3.2.3 La décision et les supports de connaissances

Afin de pouvoir prendre la décision, surtout dans le cas des décisions humaines semi directes ou des décisions de pilotage, des supports de connaissances doivent être mis en place avant toute décision. Ceci permet de formaliser et de convertir les variables physiques en variables compréhensibles par l'ordinateur.

3.2.4 La structure des systèmes de décision

[Tharumarajah et Bemelman97] ont cité trois modes différents pour la prise de décision au niveau d'une chaîne logistique à savoir :

- ✓ Le mode centralisé : avec ce mode, une entité prend la décision, en essayant de prendre en considération les contraintes de chaque installation, et donne une solution.
- ✓ Le mode hiérarchique : où existe un supérieur du point de vue hiérarchique qui prend toutes les décisions, les autres installations de la chaîne, en fonction de leurs capacités, essaient de respecter la décision déjà prise en prenant des décisions locales.
- ✓ Le mode hétérarchique : dans ce mode de prise de décision, toutes les installations résolvent les conflits qui peuvent arriver entre elles tout en assurant une coordination.

On rappelle que les notions de groupes d'objets de décision sont sous la responsabilité d'un décideur. La coordination sera donc la vérification ou la construction de la cohérence entre deux ou plusieurs familles d'objets de décision. Un décideur peut avoir plusieurs noyaux de décision. Elle concerne aussi la cohérence avec le monde extérieur.

3.3 La coordination au sein des chaînes logistiques : définitions et état de l'art

Au sein des chaînes logistiques, nous distinguons la coordination partielle portant sur la coordination entre deux entités (client/fournisseur) ou la coordination entre deux fonctions. [Douglas et Paul 96] ont donné un état de l'art sur les différentes formes de coordination qu'ils ont relevées, à savoir : la coordination production/distribution, la coordination stock/distribution, la coordination production/stock. A celles-ci s'ajoutent d'autres formes de coordination telles que la coordination production/marketing [Lee et Lee 99]. Un traitement très complet des principes, tenants et aboutissants des aspects de la coordination dans les entreprises a été donné par [Malone et Crowston 94]. Dans le paragraphe suivant, nous présentons plus une mise à jour de l'état de l'art réalisé par [Douglas et Paul 96].

3.3.1 Coordination production/distribution

La relation production/distribution au sein d'une chaîne logistique peut se voir de plusieurs façons. Les produits peuvent être fabriqués et transportés soit vers des centres de distribution, soit chez des détaillants ou vers des usines. Ceci fait que la littérature concernant la coordination de la production et de la distribution est très vaste. Cependant, peu de modèles ont été proposés où les deux fonctions sont étudiées en même temps ; du fait que premièrement, il est énormément difficile de résoudre beaucoup de problèmes dans ces domaines comme, par exemple, la gestion du cheminement de véhicules et l'ordonnancement des machines, deuxièmement, en pratique ces deux problèmes peuvent être séparés en introduisant des stocks de sécurité et, finalement, du fait qu'en général, au sein de chaque entreprise, la gestion de ces deux activités est réalisée par deux départements différents [Douglas et Paul 96].

Du point de vue gestion de production au sein d'une chaîne logistique, [Byrne et Bakir 99] ont présenté un algorithme hybride combinant les modèles mathématiques et les modèles de simulation. Ils ont appliqué leur algorithme sur le problème de gestion de la production sur plusieurs périodes et pour plusieurs produits. Ils ont montré l'utilité d'une méthode hybride quand les résultats d'une méthode analytique ne peuvent pas être réalisés dans le cas réel. [Kim et Kim 01] ont repris l'idée

de [Byrne et Bakir 99] pour trouver les capacités nécessaires pour avoir un plan de production faisable et optimal, ils ont utilisé ainsi un modèle hybride analytique-simulation. Ils ont proposé une méthodologie pour modifier correctement les contraintes de capacité dans le modèle analytique en utilisant les résultats du modèle de simulation.

Du point de vue coordination production/distribution, [Erenguc *et al.* 99] ont étudié la planification de la production et la distribution. Ils ont relevé les décisions qu'il faut considérer pour une optimisation globale des deux fonctions production et distribution au sein d'une chaîne logistique composée de fournisseurs, des usines et des centres de distribution. Ils ont suggéré des modèles analytiques et de simulation pour intégrer tous les niveaux de la chaîne.

[Lee et Kim 02] ont repris aussi l'idée de [Byrne et Bakir 99] et ont proposé un modèle intégrant la gestion de la production et la distribution. A travers le planning qu'ils proposent, le décideur peut prendre la décision pour minimiser le coût total pendant une période concernant quand et quel produit produire ? En quelle quantité ? Et quel chemin va-t-il prendre pour arriver au détaillant ? Combien stocker ? Et où stocker ? [Dasci et Verter 01] ont utilisé un autre cadre de modélisation, à savoir, les fonctions continues pour la représentation de la distribution des coûts et la demande des clients. Ils ont conclu que les modélisations discrètes et continues se complètent.

[Jayaraman et Pirkul 01] proposent un modèle de coordination de production/distribution au niveau stratégique et opérationnel dans le cas d'un système multi-échelon. Le modèle proposé est un problème de programmation linéaire mixte NP difficile. La solution proposée est basée sur une relaxation Lagrangienne. Son avantage est qu'elle donne une solution limite inférieure qu'ils comparent avec la solution de limite supérieure obtenue par une procédure heuristique.

3.3.2 Coordination stock-distribution

Dans le domaine de la coordination de la planification au sein d'une chaîne logistique, le premier axe de recherche était la gestion de stock pour un système multi-niveaux.

Les travaux de [Clark et Scarf 60] étaient parmi les premiers à présenter des politiques optimales de gestion de stock pour un réseau en structure série, ceci en se basant sur une approche de décomposition récursive. Plusieurs autres travaux sont développés dans ce domaine comme ceux de [Rogers et Tsubakitani 91].

3.3.3 Coordination production-stock

Un autre aspect de la coordination au sein d'une chaîne logistique est la coordination entre la production et le contrôle du niveau de stock. Du fait de l'implémentation du juste à temps au niveau des ateliers de production, la disponibilité de l'information s'avère nécessaire pour une meilleure coordination entre les différents partenaires de la chaîne.

Les modèles de gestion et du contrôle du stock ont été étudiés dans plusieurs travaux de recherche. Nous citons le travail de [Gavernini 01]. Il a présenté un modèle de coopération dans un arrangement typique de distribution de la production. Le système étudié est formé d'un fournisseur qualifié produisant et distribuant un produit simple à plusieurs détaillants identiques.

Il a présenté trois niveaux de coopération. Le premier consiste à considérer les demandes suivant des séquences prédéterminées. Pour le deuxième, les demandes tiennent compte du niveau de stock de chaque détaillant et pour le troisième, en supposant qu'en cas d'insuffisance de stock chez le fournisseur, le produit peut être vendu d'un détaillant à l'autre.

3.3.4 Coordination client/fournisseur

Le niveau de base d'une chaîne logistique est l'approvisionnement de la matière première, or le plus souvent le coût des composants représente un grand pourcentage du prix de revient du produit. C'est ainsi que les anciens modèles de gestion de stock se sont centralisés pour la détermination de la quantité optimale à approvisionner.

[Chen *et al.* 01] ont étudié un système fondamental à deux niveaux dans lequel les volumes de ventes des détaillants sont de manière endogène déterminés sur la base des fonctions connues de demande. Spécifiquement, leurs travaux étudient le cas d'une chaîne de distribution où un fournisseur distribue un produit à plusieurs détaillants qui le distribuent de leur part à des clients. La demande sur chaque marché arrive sans interruption à un taux constant qui est une fonction décroissante générale du prix de détail sur le marché. Ils ont défini une stratégie optimale, maximisant le profit total au niveau du système dans un système centralisé.

D'autres travaux récents portent sur la coordination production-marketing et les fonctions logistiques. Dans ce sens, [Chehoon *et al.* 02] ont proposé une solution pour atteindre un niveau optimal dans les activités de marketing et la réduction de coût lié à la logistique. Ils ont considéré un distributeur avec trois types de décision. D'abord, le distributeur peut contrôler la demande pour maximiser le bénéfice. En second lieu, le distributeur peut réduire le coût des commandes pour

investissement sur les systèmes avancés de logistique. Troisièmement, l'investissement du distributeur se base sur la favorisation des promotions permettant une demande additionnelle.

[Cvsa et Gilbert 02] ont étudié le cas d'une chaîne logistique qui se compose d'un fournisseur monopolistique et de deux clients identiques. Le produit concerné a un cycle de vie court, qui peut être vu comme une seule période. Les auteurs ont montré que, le fait que le fournisseur transmet ses possibilités de livraison aux clients sans tenir compte de ses délais exacts est toujours bénéfique pour toute la chaîne logistique. Ils ont comparé le cas d'une variation basse de la demande et une variation aigue. Ils ont supposé que le fournisseur n'a pas de contrainte de capacité et que le coût de production est constant et indépendant des clients. Ils ont supposé que la concurrence entre les deux clients est basée sur la quantité, et que la fonction inverse de la demande, pour le produit final, et la quantité stockée par les deux clients est linéaire.

En conclusion, assurer une coordination des différents participant d'une chaîne logistique nécessite la mise en accord de l'ensemble des nœuds sur un ou plusieurs mécanismes et outils nécessaires pour la bonne conduite de la chaîne.

3.4 Quelques outils pour la coordination au sein d'une chaîne logistique

3.4.1 Les contrats

Les contrats constituent un moyen de coordination entre entreprises. Ils sont de plus en plus utilisés afin de formaliser les relations entre les entreprises partenaires et de fixer les modalités de fonctionnement. Les clauses du contrat spécifient les devoirs et les droits mutuels reflétant les arrangements possibles entre partenaires [Marshall 00]. Dans une relation de commerce, ces arrangements spécifient les dates de livraison, la qualité des produits, les délais acceptables de livraison, les prix de ventes, les procédures, les terminologies partagées...

Les contrats encadrent des décisions stratégiques car ils sont signés et mis au point au niveau de la conception du fonctionnement de la chaîne logistique. Ce sont des contraintes au niveau opérationnel destinées plus au moins à protéger chaque nœud de la chaîne logistique de variations trop importantes que pourraient lui imposer d'autres nœuds de la chaîne logistique. Leur objectif premier est d'essayer d'assurer la pérennité du nœud. Pour pouvoir avoir des solutions faisables dans une EV, il faudra admettre qu'il existe deux types de contrats : les contrats durs que l'on doit absolument respecter et les contrats flexibles que l'on pourra ne pas respecter mais qui conduiront à

une compensation à négocier (souvent financière mais éventuellement correspondant à une relaxation de contraintes).

Au sein d'une chaîne logistique, plusieurs travaux se sont basés sur une perspective de contrats spécifiques. Par exemple, [Tsay 99] a étudié les contrats qui permettent à une société d'une capacité limitée d'ajuster sa quantité d'achat en réponse à la nouvelle information de demande alors que la date de livraison approche. [Li et Kouvelis 99] ont montré comment, en présence de l'incertitude du prix d'un produit, une entreprise peut être flexible en terme de quantité et de délai de livraison avec son fournisseur, s'ils ont un contrat de partage de risque. Toutefois, plusieurs auteurs se sont orientés plus sur les notions de confiance et de son rôle dans le développement des relations interentreprises [Lorenz 96], [Hanffield et Bechtel 02]. Au niveau configuration et planification d'une chaîne logistique ou d'une entreprise virtuelle, [D'Amours *et al.* 99] étudient trois types de protocoles et leurs impacts sur les performances économiques de la chaîne. Ils les ont comparés dans le cas d'un partenariat industriel :

- ✓ le protocole "Supplying-type bids" qui est le plus simple des trois. Il ressemble à une sorte de vente au catalogue où des produits sont offerts aux prix prédéterminés. Si le client n'est pas satisfait, alors il cherche ailleurs car le fournisseur n'a aucune flexibilité.
- ✓ le protocole "Customizing type bids" : il peut être associé à une forme de relation d'affaires. Le client formule sa demande (en terme de quantité et délai) et choisit parmi les alternatives du fournisseur. Dans cette relation, le fournisseur et le client investissent pour l'établissement de solides relations.
- ✓ le protocole "Webbing type bids" utilisé dans une relation de partenariat intégré : dans ce cas, le client établit ses besoins et demande les caractéristiques opérationnelles au fournisseur du jour le jour. Par sa connaissance des capacités de production et ses fonctions de prix, le client obtient un niveau maximum de flexibilité.

3.4.2 Le partage de l'information

L'information sert de moyen de connexion entre les différentes phases de la chaîne logistique. Elle permet aux partenaires de la chaîne de coordonner leurs actions et de rendre les activités de chaque acteur de la chaîne transparentes pour les autres partenaires. Plusieurs recherches ont prouvés que le succès de l'intégration d'une chaîne logistique réside dans la capacité des partenaires à partager l'information et la synchronisation de leurs activités.

[Srinivasan *et al.* 94] ont prouvé que dans un environnement en juste à temps, l'échange d'information augmente la performance des délais de livraison, et ont rappelé que les japonais, qui sont les inventeurs des techniques juste à temps, ont planifié le partage de l'information au niveau stratégique de la chaîne.

Sur ce sujet, plusieurs recherches ont montré l'impact du partage des flux d'information sur l'amélioration de plusieurs critères de la chaîne. Citons à titre d'exemple :

- ✓ Minimisation des niveaux de stock [Chopra et Meindl 01], [Bourland *et al.* 96]
- ✓ Le rôle de partage des prévisions avec les clients et l'amélioration de la qualité des services [Ernst et Kamrad 97], [Thonemann 02] et [Zhao *et al.* 02].
- ✓ L'amélioration des plannings de toute la chaîne [D'Amours 99], [Cowling et Johansson 02] et [Kovacs *et al.* 03].

Ainsi, à notre sens, un réseau fiable de communication et de partage d'information sera l'infrastructure de toute entreprise virtuelle ou entreprise étendue. En pouvant inter opérer et échanger l'information en temps réel; l'ensemble des entreprises agissent comme une seule entreprise. [Lin et Shaw 01] ajoutent que la majorité des problèmes du contrôle et de gestion des chaînes logistiques, spécifiquement les flux de produits, est directement lié à la qualité des flux d'informations partagés qui dépendent à leur tour de:

- Données incomplètes
- Oubli de détails d'information
- Fausses données
- Systèmes d'informations mal conçus. Tous ces problèmes peuvent être dus aux problèmes de lecture des codes barres, des compétences des gestionnaires...

3.4.3 Les règles de jeu gagnant-gagnant

Un aspect primordial du partenariat est que des relations d'accord à long terme soient établies entre entreprises et que les efforts de compétitivité sont faits ensemble. De ce fait, chacun prend sa décision jugée la meilleure non pas de son seul point de vue mais d'un point de vue collectif. Un partage équitable des différents coûts (gains ou pertes) est très utile pour obtenir des résultats

opportuns de la coopération [Kulmala *et al.* 02]. Ce qui suppose qu'un haut niveau de confiance doit être établi entre partenaires [Hadfield 02].

En conclusion, la coordination entre partenaires de la chaîne logistique nécessite une participation globale de tous les acteurs afin de coordonner toutes les fonctions, pour aboutir à un planning qui satisfait le client final du point de vue coût, qualité et délai de livraison, et d'autre part, satisfaire les fournisseurs des différents niveaux du point de vue profit et continuité de production. D'où le besoin d'une planification collaborée incluant tous les partenaires et les fonctions clés de toute la chaîne.

3.5 Planification

La planification des chaînes logistiques (SCP supply chain planning) concerne la coordination et l'intégration des activités métier réalisées par une entreprise, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit final aux clients [Gupta *et al.* 03]. Son rôle est de convertir les flux d'informations sous forme de signaux coordonnés afin de satisfaire le client final. Ces signaux sont transmis niveau par niveau à travers toute la chaîne [Van Landeghem et Vanmaele 02].

Dans notre cadre, nous définissons la planification locale comme étant l'ensemble des décisions correspondant au noyau de décision d'un secteur de production ou d'un secteur de transport. La planification globale est constituée de l'ensemble des planifications locales qui sont cohérentes si la coordination s'est bien déroulée.

Dans le cadre de la gestion de production et des flux [Giard 03], la planification se situe au niveau du moyen terme et correspond à des prises de décisions tactiques, en supposant que les décisions stratégiques correspondant à la structuration physique du système de production ou de la chaîne logistique à long terme ont été prises au préalable et que, si nécessaire, des niveaux d'ordonnancement et de pilotage permettront de prendre sur un horizon plus court des décisions opérationnelles prenant en compte des contraintes plus précises.

Dans le cadre de notre travail, nous ne nous intéressons pas au niveau détaillé de l'ordonnancement, en conséquence de quoi, nous allons considérer que les modèles de planification retenus, qui représentent de manière simplifiée la production et constituent le niveau opérationnel de nos chaînes logistiques (cf. dans l'introduction la définition de ce qui est une opération et le niveau opérationnel).

La planification consiste à élaborer un plan de production (incluant les transports internes et externes si nécessaire) faisable de toute la chaîne sur un horizon donné de planification à moyen terme tout en répondant aux questions "quoi, combien, quand et comment". En d'autres termes, elle indique pour chaque période et pour chaque entité de la chaîne :

- ✓ les quantités à produire pour chaque type de produit
- ✓ les quantités à livrer à chaque client
- ✓ les approvisionnements nécessaires en matières premières et composants
- ✓ les quantités à stocker et/ou à déplacer.

L'horizon de planification représente l'intervalle de temps sur lequel est établi le plan de production. Dans la plupart des cas, l'horizon est discrétisé en périodes (unités de temps). Toutes les données de production, d'approvisionnement... dépendent des périodes. L'horizon de planification diffère d'une chaîne à une autre en fonction des cycles de production des produits. Etant associés dans le cadre d'une chaîne logistique, en principe, tous les partenaires doivent se mettre d'accord sur la période qui va être utilisée.

Afin de maîtriser et bien comprendre les relations interentreprises en terme de flux circulant entre elles, une modélisation de la chaîne logistique s'avère nécessaire.

4 Modélisation des chaînes logistiques

4.1 Introduction

Un modèle peut être défini comme une représentation abstraite d'un système ou d'un objet utilisée par exemple pour en visualiser le fonctionnement. Dans le cadre des chaînes logistiques, on peut distinguer des modèles s'attachant à représenter et formaliser le fonctionnement au jour le jour de la chaîne, ou ce qu'on appelle les architectures de chaîne logistique [Kenjstad 98], et des modèles de conception des outils d'aide à la décision aux niveaux stratégiques, tactiques ou opérationnels. Ces derniers s'intéressant à modéliser et optimiser deux ou plusieurs fonctions de la chaîne.

Afin de modéliser une chaîne logistique en général, plusieurs outils ont été utilisés. Nous citons les graphes de série parallèle [Srinivasan et Moon 99], les modèles CIMOSA [Vernadat 96], les réseaux de Petri, les méthodes orientés objet [Azevedo et Sousa 00] et les systèmes multi agents. Une comparaison détaillée de ces différents modèles est donnée dans [Monteiro 01]. Les résultats

de sa comparaison l'ont conduit à préférer les réseaux de Petri pour le type de pilotage qu'il considérerait. En effet, les différents outils et modèles sont plus au moins adaptés selon les objectifs recherchés.

Actuellement, plusieurs recherches ont prouvé que les systèmes multi agents constituent une réponse pour la modélisation requise pour les chaînes logistiques. En effet, ces systèmes ont été utilisés dans le contrôle de l'entreprise [Parunak 87], la conception collaborée [Parunak *et al.* 97a], la coordination par systèmes multi-agents pour la gestion des entreprises manufacturières agiles [Barbuceanu et Fox 96], le contrôle et l'ordonnancement des opérations de production [Parunak *et al.* 97b] [Choi et Park 97] et pour la détermination des séquences de production [Wooldridge *et al.* 96].

4.2 Les systèmes multi-agents

4.2.1 La notion d'agent

Un agent peut être défini comme une entité (physique ou abstraite) capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, disposant d'une représentation partielle de cet environnement, pouvant communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents [Ferber et Ghallab 88]. D'un point de vue pratique, un agent peut être un système informatique situé dans un environnement qu'il peut percevoir et sur lequel il peut agir, de manière autonome [Boissier 99].

Un agent a donc deux fonctionnalités. Une qui est sociale et concerne les mécanismes des activités de groupe. La deuxième concerne les règles de son fonctionnement. De ce fait, un agent est caractérisé par son intentionnalité, sa rationalité, son engagement, sa capacité de s'adapter et son intelligence.

4.2.2 Définition des systèmes multi agents

Selon la définition de [O'Hare et Jennings 96], un système multi agent est un réseau d'entités travaillant ensemble pour résoudre des problèmes qui dépassent leurs différentes possibilités. Les systèmes multi-agents constituent une approche de l'intelligence artificielle distribuée où l'expertise est distribuée sur un ensemble d'agents communiquant entre eux pour atteindre un objectif global [Huhns 87]. Selon [Gasser 90], une société d'agents est constituée de trois éléments : un ensemble d'agents, un ensemble de tâches à réaliser et un ensemble d'objets associés à l'environnement. Un

agent peut prendre la responsabilité d'effectuer une tâche s'il en a la capacité. L'organisation peut être dynamique : le groupe se réorganise à chaque fois en fonction de la tâche à accomplir.

Un problème de satisfaction de contraintes peut donc être confié à différents agents pour la résolution des problèmes, chaque agent ayant ses propres intérêts et buts. L'intérêt de la recherche dans le domaine des systèmes multi-agents est dû aux avantages significatifs inhérents à de tels systèmes, y compris leur capacité à :

- ✓ résoudre des problèmes qui peuvent être trop grands pour un agent simple centralisé dû aux limitations de ressource et/ou le risque d'avoir un système centralisé ;
- ✓ tenir compte des systèmes liés et inter-opérables, par exemple des systèmes experts, des systèmes interactifs d'aide à la décision, etc. ;
- ✓ fournir des solutions aux problèmes distribués, par exemple, le contrôle du trafic aérien, [Cammarrata *et al.* 93] ;
- ✓ fournir les solutions où l'expertise est distribuée ;
- ✓ offrir une conception claire et facile.

4.2.3 Coopération inter agents

La coopération est une caractéristique très importante dans les systèmes multi-agents [Durfee *et al.* 89] et même à notre sens la plus utile. En effet, pour la résolution d'un problème distribué, un travail coopératif des différents agents s'avère nécessaire.

Selon [Bond 90], on peut distinguer :

- ✓ La coopération au niveau d'une structure horizontale où les agents sont au même niveau. Il n'y a pas de superviseur, ni de client/serveur. C'est le cas d'un travail collaboratif où chaque agent effectue une tâche afin de compléter un seul travail.
- ✓ La coopération au niveau d'une structure verticale. Dans ce cas, les agents sont structurés par niveaux. Sur un même niveau, on peut trouver localement une coopération horizontale. Dans une telle structure, le fonctionnement d'un système multi-agents peut être décrit comme suit : l'agent reçoit le problème à résoudre d'un

autre agent qui lui est supérieur hiérarchiquement, trois possibilités sont envisageables, soit il le décompose en :

- ✓ Sous-problèmes auxquels il peut répondre localement,
- ✓ Sous-problèmes qu'il pourrait résoudre en coopérant avec les autres agents du même niveau que lui,
- ✓ Sous-problèmes qu'il fait suivre aux agents du niveau inférieur dans la hiérarchie.

4.2.4 Les modèles de la coopération des agents

Selon [Vailly et Simon 87] un système multi-agents peut coopérer suivant les modes suivants :

- ✓ Coopération par partage de tâches et de résultats, avec la possibilité de prendre en compte localement les plans des autres.
- ✓ Commande : un agent supérieur A décompose le problème en sous-problèmes qu'il répartit entre les autres agents X_i . Ceux-ci le résolvent et renvoient les solutions partielles à A .
- ✓ Appel d'offres : A décompose le problème en sous-problèmes dont il diffuse la liste. Chaque agent X_i qui le souhaite envoie une offre ; A choisit parmi celles-ci et distribue les sous-problèmes. Le système travaille ensuite en mode commande.
- ✓ Compétition : avec ce mode de coopération, A décompose et diffuse la liste des sous-problèmes suivant le mode appel d'offres, chaque agent X_i résout un ou plusieurs sous-problèmes et envoie les résultats correspondants à A qui à son tour fait le tri.

4.2.5 Résolution des conflits entre agents par coordination

Du moment que chaque agent est autonome et que ses actions et ses buts dépendent des actions des autres agents, des situations conflictuelles peuvent arriver dans le système. Ceci nécessite l'utilisation des techniques de résolution des conflits. [Boissier 99] a classé les techniques de résolution de conflits en :

- ✓ Structure normative : où sont définies des normes et des lois de comportement avec existence d'un usage de force ou d'une autorité (poids supérieur) qui sanctionne en cas de non respect des normes.
- ✓ Agent Médiateur : c'est un agent arbitre. Disposant des différents points de vue, il essaie en cas de conflit de proposer des solutions de compromis.
- ✓ Négociation : les agents en conflits entrent dans une série de tractations d'échanges et de compromis de manière à parvenir à un accord, c'est-à-dire une situation qui satisfasse les différentes parties.

4.2.6 Les protocoles de négociation

Le protocole "Contract Net Protocol" (CNP) établi par [Smith 88] reste la configuration de base de beaucoup de protocoles de coopération à base d'appel d'offres. Le protocole CNP consiste en quatre phases à savoir :

- Annonce de tâches (task announcement) : le gestionnaire des tâches (agent) avise les autres agents sur l'existence d'une tâche à accomplir.
- Traitement de la tâche annoncée (task announcement processing) : chaque agent établit sa liste de nouvelles tâches à exécuter qu'il avait reçue auparavant.
- Proposition d'une offre (Bidding) : l'agent sélectionne les tâches auxquelles il peut répondre et fait des propositions. Chaque proposition mentionne les capacités que va fournir l'agent pour l'accomplissement de la tâche.
- Traitement de l'offre : dès que le gestionnaire reçoit une offre satisfaisante, il l'accepte et l'attribue au soumissionnaire associé, qui devient alors un entrepreneur de la tâche.

Plusieurs autres extensions du protocole CNP ont été proposées dans la littérature, en essayant d'étendre l'application de ce protocole à divers domaines. Les extensions concernent :

- ✓ L'introduction de nouveaux comportements tels que la concession temporelle, le rejet temporel, la concession définitive et le rejet définitif quand la demande dépasse la capacité d'un agent simple. Ce contexte implique un protocole CNP étendu [Fischer *et al.* 95].
- ✓ L'introduction des techniques de la logique floue (Fuzzy theory) pour déterminer la nouvelle tâche à annoncer et le choix de la meilleure offre [Vojdani 97].

- ✓ L'utilisation de contrats et de raisonnements à base de cas pour réduire les charges de communication [Takuya *et al.* 96].
- ✓ La permission accordée à des agents de choisir des niveaux d'engagements dynamiques pour des négociations itératives d'attribution de tâche [Sandholm et Lesser95].
- ✓ L'attribution d'un temps d'engagement à chaque message. Ce type de protocole de négociation a des propriétés des systèmes dynamiques où la disponibilité des ressources peut changer pendant que le système effectue une tâche [Lee *et al.* 00].

D'autres protocoles de négociation ont été utilisés dans la littérature. Nous citons celui de [Lin et Soldberg 92], qui à notre sens constitue une extension du Contract Net Protocol, le protocole réadapté par [Macchiaroli et Riemma 02], pour l'ordonnancement au sein d'un job shop, où le schéma de négociation se présente comme suit (Figure I-4) :

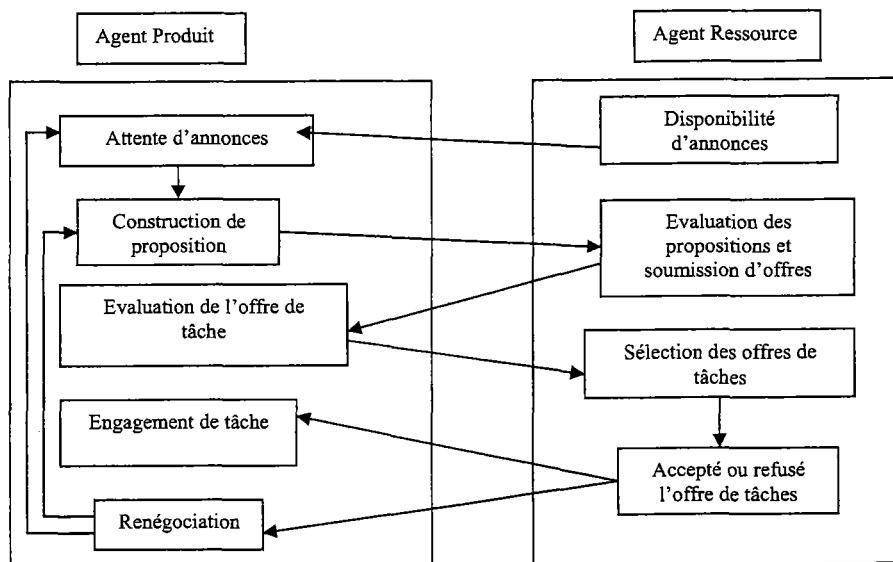


Figure I-4. Schéma de négociation de Macchiaroli et Riemma

Dans ce schéma, la négociation peut prendre du temps. En d'autres termes, si les propositions ne coïncident pas avec les offres, une renégociation est mise en jeu. Pour les auteurs, la décision d'arrêter la négociation et la non utilisation de la machine par n'importe quel produit représente une perte non-récupérable pour le système de production [Macchiaroli et Riemma 02].

4.3 La modélisation des chaînes logistiques par les systèmes multi agents : état de l'art

Les recherches dans le domaine de la résolution des problèmes distribués avec les systèmes multi agents peuvent être classés en deux grands domaines : la construction des systèmes multi-agents et la prise de décision au sein d'un agent [Pooja et Sanjay 01].

Les recherches sur la construction des systèmes multi agents concernent le développement des architectures de processeurs et des protocoles de communication. Son objectif principal est la conception des processeurs locaux, les mécanismes de la communication et les protocoles garantissant que les messages soient délivrés. En ce qui concerne la prise de décision, elles s'intéressent au partage du contrôle et des connaissances, en particulier, comment mettre en place un système efficace pour la résolution des problèmes par des entités indépendantes ; dans cette classe, on s'intéresse plus au contenu de l'information à communiquer sans prendre en compte la façon avec laquelle elle est transmise. C'est dans ce dernier sens que s'inscrit notre travail de thèse. Notre objectif final est de concevoir des modèles de planification supportés par des agents au sein d'une entreprise virtuelle afin d'arriver à des plannings "optimaux" de toute la chaîne. Chose qui ne nous empêche de faire un état de l'art sur l'utilisation des systèmes multi agents au sein des chaînes logistiques. Nous citons ainsi les travaux les plus connus dans la littérature.

[Swaminathan *et al.* 96] se sont inspirés des travaux de [Fox *et al.* 93] ont organisé la chaîne logistique comme un ensemble d'agents "structurels" et d'agents de "contrôle". Les agents structurels modélisent les entités de la chaîne tels que les fournisseurs, les entrepôts, les centres de distribution ... tandis les agents de contrôle spécifient les différentes politiques de gestion des flux de produits au sein de la chaîne logistique. Ils ont développé une librairie générique des différents agents. Ainsi, le modèle d'une chaîne logistique est construit par une instanciation et une description des agents structurels (servant pour la configuration du réseau de la chaîne) et des agents de contrôle définissant la coordination entre les agents tels que des fonctions ou des sous-routines décrivant les activités de la chaîne telles que la gestion des flux de produits, la gestion des stocks, la gestion des flux d'informations, les contrats entre partenaires... sur un horizon déterminé. Des applications basées sur ces concepts ont été développées chez IBM. Avec le même principe [Shen *et al.* 00] ont proposé MetaMorph II qui est une plate forme d'agents hybrides.

[Teruaki et Salleh 00] ont utilisé l'idée d'un système ouvert et sympathisé d'agents utilisant la négociation à base d'un tableau noir pour développer un système de chaîne logistique collaboratif. Le concept de système ouvert et sympathisé donne l'opportunité à tous les partenaires de la chaîne

d'exprimer leurs besoins. Avec cette architecture les différents partenaires peuvent communiquer et interagir pour trouver des solutions pour les éventuels problèmes.

[Parunak et VanderBok 98] ont aussi proposé un système avec trois types d'agents : agent entreprise représentant chaque entreprise au sein de la CL, agent PPIC pour la modélisation du planning de production et les algorithmes de contrôle de stock, et un agent des ventes pour la modélisation des retards et des incertitudes évoqués lors des transferts d'informations et de matières entre les agents.

L'équipe de S. D'amours à l'Université Laval a conçu une architecture appelée NETMAN pour la gestion d'une chaîne logistique. L'architecture proposée est composée de plusieurs agents coopérants. Les agents fonctionnels sont responsables de la planification et le contrôle des activités de la chaîne. On distingue des agents fonctionnels pour la logistique, pour la gestion de transport, pour la gestion des ressources, pour l'ordonnancement...les agents utilisent la négociation des coûts, délais et quantités; des modèles de programmation linéaire pouvant assister les agents pour la prise de décisions ont été développés. L'architecture proposée est hiérarchique dans le sens où l'agent logistique définit les contraintes pour les agents ordonnancement, de leur part, les agents ordonnancement définissent les contraintes pour les agents exécutant.

L'équipe de Sadeh à Carnegie-Mellon University a développé une architecture appelée MASCOT pour l'ordonnancement au sein d'une chaîne logistique. Les agents sont organisés selon différents niveaux : les agents du niveau bas de la chaîne gèrent une seule ressource du court au moyen terme sur un horizon de planification. Tandis que les agents de niveau supérieur, ils sont responsables des décisions tactiques et stratégiques d'un ensemble de ressources de la chaîne. L'architecture assure la coordination horizontale (entre des agents du même niveau) et verticale (entre des agents des différents niveaux).

[Shen *et al.* 03] ont développé une architecture de collaboration entre agents nommée CASA. Cette dernière est similaire à l'architecture MIX [Iglesias *et al.* 96]. L'architecture CASA est constituée de plusieurs modules à savoir : des agents ressources, des agents interfaces, des agents de collaboration de haut niveau, des agents de gestion de connaissances et des services ontologiques. La communication entre les différents agents est assurée par passation de messages via un "hub" central. Un cas d'application de cette architecture concernait la planification de la production multisites (cas d'une entreprise virtuelle fabriquant un produit sur trois niveaux) où les auteurs ont

détaillé des processus de négociation ainsi que les messages échangés entre les différents agents sans s'intéresser à la manière dont les agents prennent des décisions.

Nous présentons dans le Tableau I-1 d'autres travaux utilisant les systèmes multi-agents dans les différents domaines et fonctions des chaînes logistiques en général et pour les entreprises virtuelles en particulier.

Référence	Problème traité	Types d'agents (éléments de l'architecture)	Type de coordination
[Symeonidis <i>et al.</i> 03]	La planification des ressources	Hybride constitué : 1. Agent de gestion de base de données (database agent DBA) 2. Agent gérant les commandes clients (COA) 3. Agent des profits des clients (CPA) 4. Agent d'identification de modèle de stock (The Inventory Pattern Identification Agent IPIA) 5. Agent des profits des fournisseurs (The Supplier Profile Agent SPA) 6. Agent des recommandations (The Recommendation Agent RA).	Utilisant le data mining
[Pooja et Sanjay 01]	Ordonnancement distribué au sein d'un job-shop	Les agents ressources utilisent une sorte d'enchère (auction) l'annonce et la réalisation de nouvelles tâches.	S'intéresse plus aux outils mathématiques pour la prise de décision par les agents.
[Lazansky <i>et al.</i> 01]	Planification de la production	Trois types d'agents : - project planning agent (PPA) - project management agent - production agent	Négociation avec les protocoles KQML et KIF
[Maturana et Norrie 97]	Ordonnancement et planification d'un cluster virtuel	Hybride constitué de : - Agent de gestion de données - Agent médiateur actif - Agent clonage	Coordination par médiation utilisant le protocole Contract Net Protocol

Tableau I-1: tableau récapitulatif des travaux utilisant les systèmes multi agents pour la modélisation des chaînes logistiques

5 Les modèles de planification de la production au sein des entreprises virtuelles

5.1 Introduction

La planification de la production au sein d'une chaîne logistique s'inscrit dans le cadre des problèmes dits de "planification multi-sites" [Thierry 94]. Cependant, assurer la planification de la chaîne reste encore un problème majeur du fait que :

- Chaque entité de la chaîne a différentes contraintes de dates de livraison et de dates de réception de la matière première ;
- Chaque entité a un plan de charge avec des capacités limitées ;
- Les contraintes de coût des produits sont variables. Elles dépendent, entre autres, des quantités produites, des quantités approvisionnées, des quantités vendues et des moyens de transport utilisés.

[Kolisch 00] a fait un recueil des travaux traitant les modèles mathématiques pour la planification déterministe de type recherche de la taille des lots optimaux (lot sizing) à savoir les modèles IPSPO (Integrated Project Scheduling and Part Ordering), MLCL (Multi-Level Capacitated Lot sizing) et ILS (Integrated Lot sizing and Scheduling) qui ont été étudiés par plusieurs auteurs.

En ce qui concerne la planification des entreprises virtuelles, sensées utiliser les flux d'informations d'une façon plus importante, on distingue la planification centralisée et la planification distribuée.

5.2 La planification centralisée par des extensions des méthodes MRP

Avec un système centralisé de planification de l'EV utilisant des méthodes telles que MRP II, les décisions sur les plannings de production et des systèmes de commande sont prises par une unité centrale de la chaîne sans intervention des autres entités de la chaîne. Dans ce cas, vu le volume de données, la tâche de planification est difficile. Les cycles de planification peuvent prendre plusieurs heures ou même plusieurs jours et doivent être basés sur des données fixes et mises à jour. La disponibilité limitée des ressources et la capacité réelle des fournisseurs ne peuvent pas être prises en considération. Ces systèmes produisent des plans de production peu réalistes (MPS). En revanche, elle peut donner des résultats satisfaisants si l'unité centrale est alimentée à chaque moment par toutes les informations nécessaires par les entités distribuées. De plus, en raison de

l'écart quasi permanent entre la planification prévisionnelle et la production réalisée, une gestion de crise doit être prévue de manière continue, de sorte que des événements inattendus puissent être surmontés et que leurs effets ne se propagent pas sur les niveaux bas de l'EV [Rupp et Ristic 00].

Des extensions de la méthode MRP II sont utilisées avec de nouvelles fonctionnalités telles que la planification de la distribution (DRP ou distribution requirements planning) [Ganeshan *et al.* 01]. Une autre extension de cette méthode est la méthode LRP (MRP logique) [Van Donselaar 92], [Van Donselaar *et al.* 00].

Le principe de la méthode LRP consiste à transmettre les demandes des clients finaux à tous les niveaux de la chaîne sans aucun traitement. En fait, avec la méthode MRP, la demande des clients est traduite premièrement dans le planning du premier niveau de la production. Ce dernier ressort des ordres de planning qu'il transmet au niveau suivant. En tenant compte des capacités limitées de chaque entité, le résultat est que, d'une part, en général on peut ne pas répondre aux besoins de clients et, d'autre part, on ne tient pas compte des coûts réels de la logistique au sein de la chaîne.

Actuellement, beaucoup d'entreprises utilisent les outils ERP (Enterprise Resource Planning) pour la planification des chaînes logistique. [Davenport 98] définit les ERP comme étant des progiciels commercialisés pour l'intégration des flux d'informations d'une entreprise en terme de flux financiers, de ressources humaines, de chaînes logistiques et des informations concernant les clients. Ils représentent entre autres des applications des technologies de l'information au système MRP.

5.3 La planification distribuée

Dans les systèmes répartis, les tâches de planification sont transformées en problèmes spécifiques d'optimisation qui sont abordés par des unités indépendantes ou séparées géographiquement [Duffie et Prabhu 96]. Un coordinateur assure l'optimisation globale de toute la chaîne logistique. Ces systèmes peuvent réagir plus rapidement et plus efficacement aux imprévus tels que des temps d'arrêt des machines ou des commandes imprévues. Cependant, avec cette approche, un degré élevé de coordination et de communication entre les différents niveaux du système est nécessaire [Miyashita 98].

Dans la littérature, de nouveaux modèles ont été proposés dans ce sens, tels que le modèle de planification proposé par [Rupp et Ristic 00]. Leur modèle consiste à voir l'entreprise virtuelle par niveau, un processus itératif de planification de la production est réalisé en rétrograde et balayant

tous les niveaux. Avec la méthode de recuit simulé comme outil approché de résolution, chaque niveau décide des plannings à transmettre au niveau amont adjacent. L'inconvénient est qu'on suppose à tout moment que des solutions existent toujours pour chaque niveau.

[Monteiro 01] a proposé une formalisation de la coopération entre entreprises dans le cadre d'une architecture industrielle, les donneurs d'ordre et les fournisseurs planifient leur production en se basant sur la négociation des délais de livraison. Cette approche permet d'une part de propager les besoins réels de chacun des acteurs tout en tendant les flux par une politique de fabrication au plus tard.

Plusieurs travaux se sont intéressés à la modélisation décentralisée d'un système d'information pour la planification de la production d'un réseau distribué d'entreprises en utilisant une approche objet [Azevedo et Sousa 00] ou les modèles UML (Unified Modeling Language) [Tsai et Sato 04], [Calosso *et al.* 03], des méthodes hybrides analytique-simulation [Gnoni *et al.* 03] ou les systèmes holoniques [Mezgar *et al.* 00].

Le modèle présenté par [Mezgar *et al.* 00] consiste à coordonner un ensemble de petites et moyennes entreprises. Le modèle réseau pour la planification coopérative de la production est composé de trois modules :

- Le module de coordination qui assure la coordination entre les différentes entités, le choix d'unités de production et les contacts avec les clients.
- Le module de planification locale qui contrôle la planification de chaque nœud de réseau et sa relation avec les autres nœuds.
- Le module d'évaluation de performance qui évalue les différents scénarios proposés par les nœuds.

Quant aux travaux de [Tsai et Sato 04], ils s'intéressent plus à la planification et l'ordonnancement d'un système de production agile par simulation. Avec les formalismes UML, les auteurs ont modélisé les différentes données et scénarios utilisés par un nœud dans un réseau d'entreprises.

Les travaux de [Calosso *et al.* 03] consistait à modéliser avec UML un processus de planification de la production par négociation entre un ensemble d'entreprises. Le modèle statique est composé de trois classes :

- la classe représentant les trois procédures de prise de décision utilisées par le système
- la classe des commandes et les offres
- la classe représentant les informations utilisées par le système (plans de production, informations sur les fournisseurs...)

Le modèle dynamique décrit le fonctionnement du système suite à une demande client.

[Gnoni *et al.* 03] se sont intéressés au problème de la recherche de la taille des lots optimaux pour le problème d'ordonnancement (lot sizing and scheduling problem LSSP). Une intégration d'un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes avec un modèle de simulation a été appliquée pour le cas d'une entreprise multi-sites, (cas de trois sites, multi-produits et sur plusieurs périodes). Deux stratégies de production différentes ont été étudiées : la première considère que chaque site a un intérêt indépendant des autres, la seconde cherche une solution globale en considérant l'ensemble des entreprises comme une seule entreprise sans relaxation de contraintes locales.

6 Positionnement de notre problème

Notre objectif est de répondre aux problèmes de la planification opérationnelle d'une EV tout en modélisant les différents flux d'informations, de produits et de décision.

Les relations entre les différents partenaires sont réglementées par des contrats spécifiant des règles de jeu gagnant-gagnant préétablies, tandis que les relations entre l'entreprise virtuelle et l'extérieur, les clients et les fournisseurs de l'EV sont formalisées par des contrats. Les règles du jeu gagnant-gagnant doivent garantir un niveau élevé d'agilité et de non gaspillage (lean manufacturing) tout en assurant les objectifs de chacun.

Avec l'approche adoptée, la coordination et la coopération sont vues comme une action de prise de décision collective, mais distribuée, en vue de synchroniser les actions réparties chez les différents partenaires. La négociation et la médiation constituent des moyens pour assurer l'atteinte des objectifs.

Nous retenons la définition de [Müller 96] de la négociation comme étant un processus de communication dans un groupe d'agents (humains ou automatiques) afin d'arriver à un compromis mutuellement acceptable concernant un problème commun de diverses parties négociantes. Elle comporte trois aspects principaux :

- La décision : qui a une dimension intra-agent relative aux raisonnements de chaque négociateur. Elle peut être prise en définissant des fonctions d'utilité, de comparaison, de corrélation, de préférence et de stratégie de négociation. Par la suite, les actions de l'agent peuvent être l'acceptation de toute proposition, la coopération ou la compétition avec d'autres agents. Dans certains cas, l'agent peut refuser, négocier ou ne rien faire.

- Le langage : de dimension inter-agent, relatif à la communication entre les différents agents. Il concerne les primitives du langage, les sémantiques, les protocoles et les objets négociés.

- Le processus : de dimension globale relatif au comportement du système. Il est lié aux modèles de négociation tels que les comportements des participants. Deux processus de négociation sont distingués. Le premier, est appelé la négociation par compromis, où chaque agent relâche les contraintes les moins importantes, l'accord est établi lorsque les contraintes non relaxées sont satisfaites. Le second processus est la négociation intégrante où les agents cherchent à identifier leurs buts et trouver une solution qui les satisfait complètement.

Ainsi, afin de bien formaliser une co-décision par négociation d'un ensemble d'entreprises structurées en entreprise virtuelle, nous développons les axes suivants :

- ✓ Proposer une architecture convenable pour une entreprise virtuelle ayant une structure générale ;
- ✓ Proposer des outils d'aide à la décision et de planification à moyen terme pour chaque élément de l'architecture ;
- ✓ Formaliser la coordination visant à piloter les flux inter-entreprises de façon décentralisée, en spécifiant les communications ainsi que les comportements des différentes entités constituant l'architecture.

En ce qui concerne les flux de produits, cela nous amène à planifier la production et la distribution des fournisseurs pour leurs clients. Les flux d'informations concernent le partage des messages de nouvelles modifications de prévisions ou de commandes. Les flux monétaires concernent les négociations sur les coûts d'approvisionnement et de livraison entre partenaires.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux modèles de planification locale et globale d'une entreprise virtuelle tout en proposant des outils d'aide à la décision pour chaque entité de l'entreprise virtuelle.

Chapitre II

Architecture et outils d'aide à la décision pour la planification de l'entreprise virtuelle

1 INTRODUCTION	49
2 ARCHITECTURE GLOBALE DE L'ENTREPRISE VIRTUELLE.....	49
2.1 Caractéristiques de l'entreprise virtuelle.....	49
2.2 Hypothèses, notations et modèles de fonctionnement adoptés.....	51
2.2.1 Les liens avec la demande client	51
2.2.2 Horizon glissant.....	52
2.2.3 La gestion des prévisions	53
2.2.4 Les contrats	54
2.2.5 Les modèles de coût	55
2.2.6 Les modèles de données.....	56
2.2.7 Définition du coût d'une solution planifiée et du coût d'un scénario.....	59
2.3 Position du problème de la planification de l'EV.....	62
3 PROBLEMES ET MODES DE FONCTIONNEMENT D'UN NEV	62
3.1 Problèmes de construction de plannings d'un NEV	62
3.2 Les modes de planification d'un NEV	63
3.2.1 Le mode direct "D"	63
3.2.2 Le mode Rétrograde "R"	64
3.2.3 Le mode Contraint "C"	65
3.3 Les modèles d'établissement de plannings pour un NEV selon le mode de sollicitation	67
3.3.1 Les notations utilisées	67
3.3.2 La fonction objectif de la planification directe.....	69
3.3.3 La fonction objectif de la planification rétrograde	71
4 LA COORDINATION DES NEV D'UN MEME NIVEAU.....	71
4.1 Les problèmes des NEV de même niveau	71
4.1.1 Problème de répartition de composants entre NEV.....	72
4.1.2 Problème de répartition de produits à fabriquer entre NEV	72
4.1.3 Choix des solutions planifiées pour le niveau	73
4.2 Outils d'aide au choix des plannings optimaux pour un niveau	76
4.2.1 Les notations utilisées	76
4.2.2 La fonction objectif dans le cas du mode direct.....	78
4.2.3 La fonction objectif du mode rétrograde.....	79
5 RECHERCHE GLOBALE SEMI-DISTRIBUEE D'UN ENSEMBLE DE PLANNINGS COHERENTS	80
5.1 Approche itérative semi-distribuée.....	80
5.2 Description de l'algorithme de supervision	81

5.3 Liens avec les autres outils de décision	86
6 CONSTRUCTION D'UNE SOLUTION PLANIFIEE AU MOYEN D'UN ALGORITHME GENETIQUE POUR UN NEV	87
6.1 Introduction	87
6.2 Hypothèses du problème de planification à résoudre.....	88
6.3 Principes de l'algorithme génétique utilisé par l'AP.....	90
6.3.1 Génération de la population initiale de chromosomes.....	91
6.3.2 Description de l'opérateur de mutation.....	93
6.3.3 Description de l'opérateur de croisement.....	93
6.3.4 Passage de la fonction objectif à la force et sélection	94
6.4 La génération d'une solution approchée de type planning rétrograde à partir d'un chromosome.....	95
6.4.1 Test de faisabilité des quantités Q_i à la période t :	95
6.4.2 Procédure en cas de faisabilité	96
6.4.3 Procédure en cas de non faisabilité	98
7 CONCLUSION.....	99

1 Introduction

Le problème traité dans ce chapitre concerne la planification semi-distribuée des activités d'un ensemble d'entreprises, organisées en entreprise virtuelle. En établissant un système de partenariat, les entreprises se partagent les différents flux d'informations et de produits afin d'atteindre au mieux les objectifs d'une entreprise virtuelle tout en assurant un bénéfice local optimal ou proche de l'optimum sur un horizon donné et pour un environnement donné.

Notre but est de proposer d'une part une architecture de l'entreprise virtuelle par niveaux et, d'autre part, des modèles de planification qui permettent d'assurer un plan de production faisable et quasi optimal suivant l'architecture proposée. Ceci est réalisé d'abord en coordonnant les plannings des entreprises d'un même niveau, puis en coordonnant les plannings de ce niveau avec ceux des niveaux amont et aval.

Dès lors, notre objectif est d'établir un planning de production d'un ensemble d'entités distribuées par prise de décision semi-distribuée. Les moyens de coordination utilisés sont la négociation et la médiation.

2 Architecture globale de l'entreprise virtuelle

2.1 Caractéristiques de l'entreprise virtuelle

L'entreprise virtuelle (EV) considérée correspond à une structure générale de chaînes logistiques où les fonctions de production, de stockage et de distribution sont interconnectées.

L'EV se compose de plusieurs entités que nous allons appeler **NEV** (Nœuds de l'Entreprise Virtuelle). Chaque NEV est en relation avec plusieurs nœuds amont et aval au sein de l'EV.

Du point de vue relationnel entre NEVs, nous supposons qu'ils utilisent des règles du jeu qui se veulent gagnant-gagnant. Chaque partenaire, en fonction de ses capacités, fait de son mieux pour satisfaire ses clients internes ou externes à l'EV. En cas de conflit, un processus de négociation peut avoir lieu.

Les différents NEV se partagent de l'information en temps quasiment réel via un réseau de communication permettant le transfert des différents flux d'information.

L'étude des différents flux (informations et produits) au sein de l'EV revient à étudier les flux de chaque NEV avec les NEV amont et aval qui sont directement en relation avec lui. En outre, en

prenant en considération les niveaux de production au sein de l'EV où chaque NEV appartient à un niveau de production, nous pouvons représenter et décomposer l'EV sous forme de plusieurs niveaux où chaque NEV appartient à un seul niveau (Figure II-1). Nous supposons donc que chaque niveau n'est en relation qu'avec un niveau amont et un niveau aval et qu'il n'y a pas de circuit dans le graphe de la chaîne. Dans le cas de l'existence d'un flux de produits entre deux NEV de niveaux non adjacents, nous introduisons des nœuds fictifs appartenant aux niveaux intermédiaires. Ceci permet par la suite de gérer de manière quasi indépendante chaque niveau de l'EV.

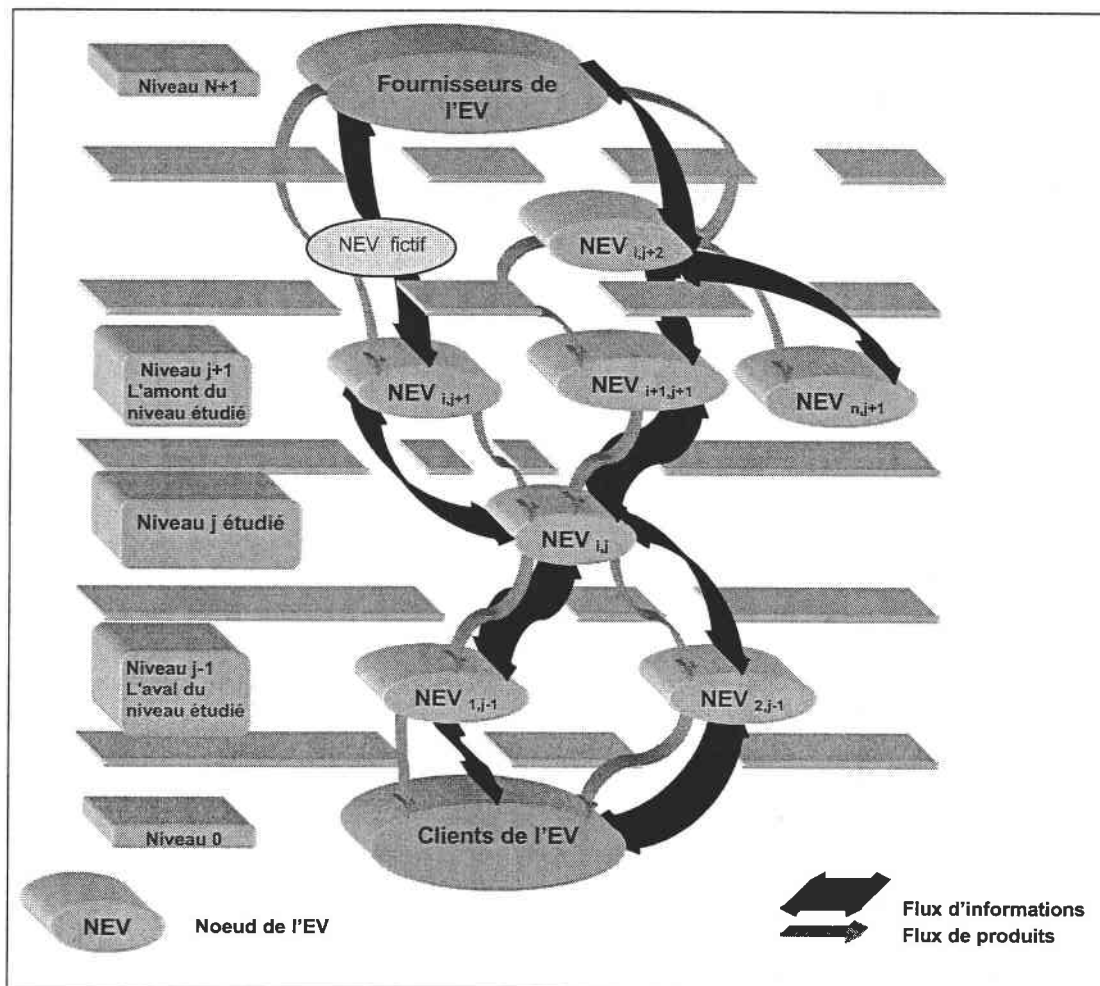


Figure II-1 : Architecture de l'entreprise virtuelle par niveaux, ici 4 niveaux

Avec cette conception de l'architecture, l'étude de l'EV revient à étudier chaque niveau en relation avec un niveau client et un niveau fournisseur. Nous distinguons trois types de niveaux au sein de l'EV à savoir :

- Le niveau en relation directe avec les clients de l'entreprise virtuelle. Il constitue le premier niveau de l'entreprise virtuelle.
- Le niveau en relation directe avec les fournisseurs des matières premières de l'entreprise virtuelle. Il constitue le dernier niveau de l'EV.
- les niveaux internes qui sont à la fois des clients et des fournisseurs au sein de l'entreprise virtuelle.

Afin d'aborder le problème de la planification de la production de l'EV, nous avons fait un ensemble d'hypothèses et de règles du jeu régissant le fonctionnement de la chaîne.

2.2 Hypothèses, notations et modèles de fonctionnement adoptés

2.2.1 Les liens avec la demande client

Différentes sources d'incertitude relatives à chaque fonction (production, transport...) apparaissent dans l'entreprise virtuelle. La principale source d'incertitude dont nous allons tenir compte dans ce travail est l'incertitude de la demande liée à la connexion entre l'EV et le monde extérieur. Elle s'exprime en termes de variations de quantités, de qualité, de répartition entre les différents produits d'une même famille, de dates de livraison des produits... Afin de tenir compte de ces incertitudes, l'EV n'a pas d'autres possibilités que de s'appuyer sur des prévisions pour concevoir sa planification au-delà de la première période de l'horizon de planification.

En fait, on peut distinguer trois types de monde extérieur à une EV, en ce qui concerne la manière d'obtenir les prévisions :

- Le monde extérieur de l'EV est un monde organisé. C'est le cas d'un monde extérieur exclusivement industriel (entreprises, réseaux de distribution bien structurés). Ceci correspond, par exemple, au cas où les nœuds du premier niveau de l'EV sont des équipementiers puissants ayant de nombreux clients de type donneurs d'ordres, qui ont besoin eux-mêmes d'avoir des prévisions pour leur propre production. Dans ce cas, ces clients, extérieurs à l'EV considérée, ont tout intérêt à fournir leurs prévisions à l'EV s'ils veulent établir un système d'échange optimal avec l'EV.
- Le monde extérieur est plus informel. Il n'est pas organisé. Il correspond à des clients finaux achetant des quantités petites voir unitaires (clients grand public) ou encore des grandes quantités mais de manière irrégulière. Il s'agit donc d'un univers beaucoup plus incertain. Dans ce cas, les NEVs du premier niveau de l'EV sont obligés de faire leurs propres prévisions.

- Le monde extérieur peut être à la fois non organisé pour certains clients et organisé pour d'autres. Dans ce cas également, les NEVs du premier niveau font des prévisions (incluant les prévisions connues de certains clients).

Dans tous les cas, les prévisions obtenues ou calculées par les NEVs du premier rang font partie des informations que se partagent les entités de l'EV. De manière indirecte, il est possible de déduire des prévisions pour les niveaux supérieurs de l'EV en utilisant une technique rétrograde d'éclatement des nomenclatures de type MRP.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous plaçons dans le cas d'une EV ayant un monde extérieur mixte. Une partie des prévisions est fournie par des clients industriels (les commandes sont généralement fermes pour la première période et prévisionnelles pour les périodes suivantes) et cette partie est complétée en utilisant des historiques de ventes et des méthodes classiques de prévisions pour tous les NEV du premier niveau.

On suppose que le traitement des historiques et l'obtention des prévisions pour le premier niveau de l'EV sont assurés par un prétraitement que nous ne décrivons pas dans cette thèse.

Pour sa planification, chaque NEV du premier niveau se base donc sur un ensemble de données qui évoluent dans le temps. En effet,

- L'augmentation prévue de la demande de certains produits peut se produire plus tard (ou plus tôt) que prévue ; dans ce cas, les prévisions baissent (ou montent) sur les premières périodes, néanmoins la demande cumulée sur l'horizon reste du même ordre de grandeur.
- Une situation similaire se produit lors d'une diminution prévue de certains produits.
- L'apparition de nouveaux produits nécessite une mise à jour des bases de données (nombre de produits, nomenclatures, données techniques liées à la production, premières séries de prévisions...).
- La disparition de produits est plus simple quant à la mise à jour des bases de données, néanmoins, elle peut entraîner des pertes financières liées aux stocks de produits finis ou de composants devenus définitivement inutiles à tous les niveaux de l'EV.

2.2.2 Horizon glissant

Pour tenir compte de ce processus dynamique des prévisions et afin de réactualiser les informations disponibles, les NEVs utilisent la technique, très utilisée en entreprise, du plan glissant pour la planification comme le montre la Figure II-2.

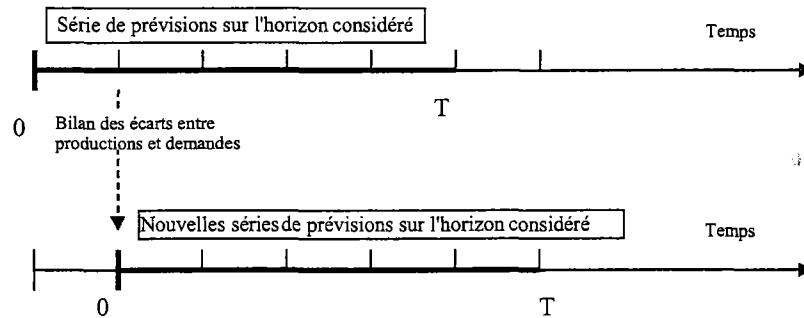


Figure II-2 : Planification sur un horizon glissant

Au début de chaque période du planning, chaque NEV doit prendre en compte les éventuelles modifications. Il vérifie ses stocks, ses capacités de production et d'approvisionnements dans le but d'optimiser l'utilisation des ressources et de satisfaire ses clients.

2.2.3 La gestion des prévisions

Les prévisions fournies par le monde extérieur ou calculées par les NEV de rang 1 sont l'extrapolation d'historiques du passé avec prise en compte d'éventuels événements exceptionnels. Elles sont donc constituées de vecteurs dont chaque coordonnée constitue l'estimation de la demande pour un produit et pour une période de l'horizon de planification. A partir de ces vecteurs de demandes instantanées, nous construisons des vecteurs de demandes cumulées où chaque coordonnée contient pour un produit la somme des estimations de la période 1 à la période considérée. Ces courbes cumulées ou courbes en escalier contiennent une information plus lisible lorsque l'on gère des stocks qui servent de tampons entre les différents niveaux de l'EV. En effet, les contraintes de faisabilité pourront toujours être formulées sous la forme suivante : *la courbe cumulée des sorties d'un stock doit toujours être inférieure ou égale à la courbe cumulée des entrées d'un stock*. En particulier, si l'on anticipe une production en raison de limite de capacité, cela ne remet jamais en cause les conditions de faisabilité de la gestion du stock de produits fabriqués correspondant. Des distances calculées entre deux courbes cumulées de livraison du même produit auront plus de signification (variation de l'état instantané des stocks) que des distances calculées sur le vecteur de livraison. En outre, l'écart entre deux coordonnées non consécutives d'une courbe cumulée donne immédiatement la consommation ou l'approvisionnement sur l'intervalle correspondant.

Certains donneurs d'ordres cherchent à compléter leurs prévisions par des fourchettes minimales et maximales de demandes. Dans ce cas également, il faudrait leur conseiller de rechercher des

fourchettes sur les prévisions cumulées, car ces fourchettes pourraient être plus serrées : en effet, il est rare que l'écart entre la prévision retenue et la réalisation de la demande soit positif (respect. négatif) sur plusieurs périodes consécutives. Il y a donc un phénomène de compensation qui peut être pris en compte sur les données cumulées alors que c'est totalement impossible sur les données brutes. Dans le cadre de cette thèse, nous n'utilisons pas de fourchettes sur les prévisions, cumulées ou non, mais la connaissance de telles fourchettes sera supposée partiellement connue par les couples de NEV qui acceptent d'établir des contrats bilatéraux.

Le dernier niveau, en relation avec les fournisseurs extérieurs de l'EV, a pu lancer dans le passé des commandes pour des matières premières ou des composants aux fournisseurs de l'EV. Si c'est le cas, ces commandes sont supposées imposées. Pour obtenir les arrivées en stock nécessaires à la première période, nous pouvons supposer, soit que la capacité des fournisseurs externes est infinie et qu'un surcoût sur les matières premières peut avoir lieu en cas de dépassement de ce qui est convenu, soit que la disponibilité des fournisseurs est limitée strictement à une courbe cumulée maximale (éventuellement très grande).

2.2.4 Les contrats

Dans le cadre de notre étude, nous distinguons deux types de contrats pour l'EV : des contrats avec l'extérieur de l'EV et d'autres entre NEV. Avec l'extérieur, nous supposons que les contrats spécifient les quantités minimales et maximales à livrer pour chaque produit et pour chaque fin de période sur une durée donnée. Des contrats plus complexes peuvent être également associés à une série de périodes consécutives pour lesquelles des fourchettes plus serrées peuvent être déterminées sur le cumul des demandes sur la durée considérée. En cas de retard de livraison de la part de l'EV, des pénalités de retard sont envisageables. De même, en cas de non respect des contrats par les clients, des coûts supplémentaires peuvent leur être facturés.

Des contrats similaires peuvent exister entre un NEV et un autre NEV appartenant au niveau amont. Les prévisions déployées sur l'ensemble de l'EV peuvent permettre à chaque niveau de négocier des fourchettes probables de besoins en composants qui ont fait l'objet de négociations à long terme entre clients et fournisseurs. Ces besoins probables ne sont néanmoins que des fourchettes indicatives de ce qui se passera plus tard.

Lorsque plusieurs NEV d'un même niveau fabriquent le même produit, ils sont en compétition pour l'obtention des quantités à produire à chaque période. Pour éviter des déséquilibres importants entre les charges confiées à chaque NEV, des contrats peuvent être conclus entre ces NEV qui

garantissent à chacune d'entre elle soit un pourcentage de quantité minimale et maximale de chaque produit sur un intervalle de temps, soit un pourcentage de charge minimale et maximale pour des produits appartenant à la même famille.

Un autre type de contrat global peut être mis en place qui garantit que tout NEV est bénéficiaire, si ce n'est à chaque période, au moins sur tout horizon glissant considéré. Dans le cas où un NEV est déficitaire sur un horizon, l'EV lui garantit une compensation sur sa marge bénéficiaire globale.

Pour simplifier, nous supposons qu'il n'y a pas de contrat avec les fournisseurs extérieurs. Nous adoptons également l'hypothèse qu'ils ont une courbe de livraison cumulée à ne dépasser en aucun cas (ce qui serait leur capacité maximale de production si l'EV était capable d'exiger qu'ils ne travaillent que pour elle). Nous n'introduisons pas dans notre modèle de cycle de négociation avec les fournisseurs.

2.2.5 Les modèles de coût

Pour pouvoir travailler au sein de l'entreprise virtuelle, les NEV ont besoin d'avoir des modèles de coût pour leur permettant de négocier et de décider.

Dans notre cadre, nous distinguons quatre types de modèles de coût :

- Le modèle de coût global : Il concerne le calcul de la marge globale de l'EV. L'optimum absolu serait de maximiser l'écart entre les prix de vente et tous les coûts au sein de l'EV.
- Le modèle de coût inter-niveaux : Il prend en compte les coûts associés au stockage des composants entre un niveau fournisseur et un niveau client. En effet, on ne prend pas en compte dans les modèles de planification des NEV le coût de stockage des composants avant leur utilisation par un NEV et le coût de stockage des produits finis après leur production par un NEV. On aurait pu éventuellement le faire si sur un niveau, il n'existait pas deux NEV fabriquant le même produit ou deux NEV utilisant le même composant. Dans le cas contraire, au moment de la répartition des composants disponibles entre les différents NEV l'utilisant, on peut diminuer comme on veut le coût de stockage associé à certains NEV au détriment d'autres NEV. Le seul moyen d'être équitable est de considérer que les coûts de stockage entre niveaux sont à la charge du niveau global de l'EV.
- Le modèle de marge locale à chaque NEV : Celui-ci revient à maximiser l'écart entre les prix de vente à ses clients et la somme des prix d'achat des composants à ses fournisseurs et de ses coûts de production. Les prix d'achat et de vente pour les NEV internes peuvent n'être

que virtuels (c'est-à-dire fixés arbitrairement dans le cadre des activités de l'EV). Pour un NEV, la seule information significative est sa marge locale, qui peut être corrigée par des compensations. La somme des marges locales est toujours égale à la marge globale.

- Le modèle local de coût lié à chaque NEV : Il cherche à minimiser les coûts de production tout en respectant des contraintes de dates d'arrivée des composants. Il peut comporter des parties fictives correspondant à des pénalités de retard internes à l'EV.

Notre objectif est donc de choisir des modèles de coût locaux et de coûts inter-niveaux qui nous permettent d'avoir une marge globale aussi grande que possible.

2.2.6 Les modèles de données

Comme nous l'avons indiqué au niveau des prévisions, une structure de données que nous allons abondamment utilisée dans cette thèse est la structure de courbes cumulées de besoins ou de réalisations.

Situé entre ses clients et ses fournisseurs, chaque NEV est contraint par des courbes cumulées d'approvisionnement, notées **CCA**, et des courbes cumulées de livraison, notées **CCL**. Nous distinguons:

- Les courbes cumulées de livraison qui sont considérées comme des données. Elles sont imposées ou souhaitées par l'aval. Nous les désignons par **CCLD**.
- Les courbes cumulées de livraison qui correspondent à des variables. Elles sont calculées par le NEV. On suppose que le NEV livre dès qu'il a produit. Ces courbes cumulées sont donc généralement, ajustées au plus tôt sur un planning de production retenu. Nous les désignons par **CCLV**.
- Les courbes cumulées d'approvisionnement qui sont considérées comme des données. Elles sont imposées ou souhaitées par l'amont. Nous les désignons par **CCAD**.
- Les courbes cumulées d'approvisionnement qui correspondent à des variables. Elles sont calculées par le NEV. On suppose que le NEV utilise les composants dès qu'il les reçoit. Ces courbes cumulées sont donc généralement ajustées au plus tard sur un planning de production retenu. Nous les désignons par **CCAV**.

Pour le calcul des plannings, chaque NEV utilise deux types de modèles de données. Le premier correspond à son modèle de production en termes de type de système de production, d'autorisation ou non de la sous-traitance, de la disponibilité en heures supplémentaires... Le deuxième modèle est celui des courbes cumulées qu'on lui impose (CCLD et/ou CCAD).

Le résultat d'un planning s'exprime selon deux modèles. Le premier exprime l'utilisation effective du système de production (il s'agit de la sous-traitance utilisée à chaque période, la capacité utilisée...). Ce modèle constitue le modèle local du coût. Le deuxième ressort les courbes cumulées calculées CCAV et/ou CCLV. Dans la suite, nous appellerons le résultat d'un planning constitué par les deux premiers modèles **une Solution Planifiée**.

Chaque solution planifiée sera donc un ensemble de :

- Courbes cumulées d'approvisionnement CCAV pour chaque composant
- Courbes cumulées de livraison pour chaque produit fabriqué CCLV
- Modes d'utilisation des outils de production et coûts correspondants

Sous les contraintes des CCAD, CCLD et du modèle de production choisi (Figure II-3).

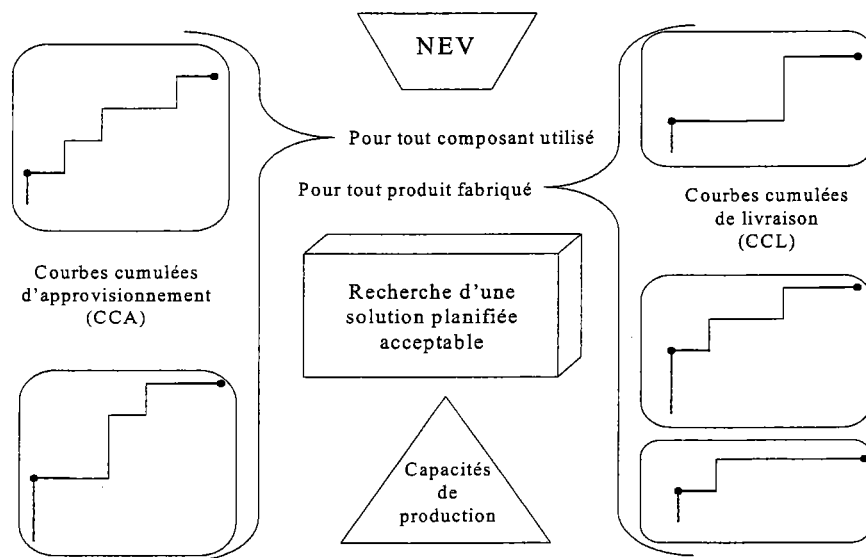


Figure II-3 : Recherche d'une solution planifiée d'un NEV

Par ailleurs, ayant structuré l'EV par niveaux, deux niveaux adjacents s'échangent des courbes cumulées. On note bien que les courbes cumulées entre niveaux diffèrent de celles utilisées par un NEV. En effet, les Courbes Cumulées Approvisionnement (respect. Livraison) qu'un niveau envoie à son niveau amont (respect. aval) adjacent sera la somme de toutes les Courbes Cumulées Approvisionnement (respect. Livraison) de tous les NEV du niveau pour le même composant.

Dans la suite, nous appellerons l'ensemble des courbes cumulées des NEV d'un niveau que ce dernier transmettra au niveau adjacent (amont ou aval) **une Solution Planifiée du Niveau**. Une solution planifiée du niveau se présente donc comme un ensemble de courbes cumulées d'approvisionnement qu'on désigne par **NIV_CCAV** pour chaque composant du niveau, de courbes cumulées de livraison **NIV_CCLV**, pour chaque produit plus un coût de la solution composée de trois parties, un coût correspondant à l'amont (resp l'aval) liés aux courbes utilisées **NIV_CCAD** (resp **NIV_CCLD**) selon que l'on est en mode direct (resp rétrograde), un coût de stockage à l'amont (resp à l'aval) et un coût local de production.

La recherche d'une solution planifiée de niveau est représentée sur la Figure II-4 .

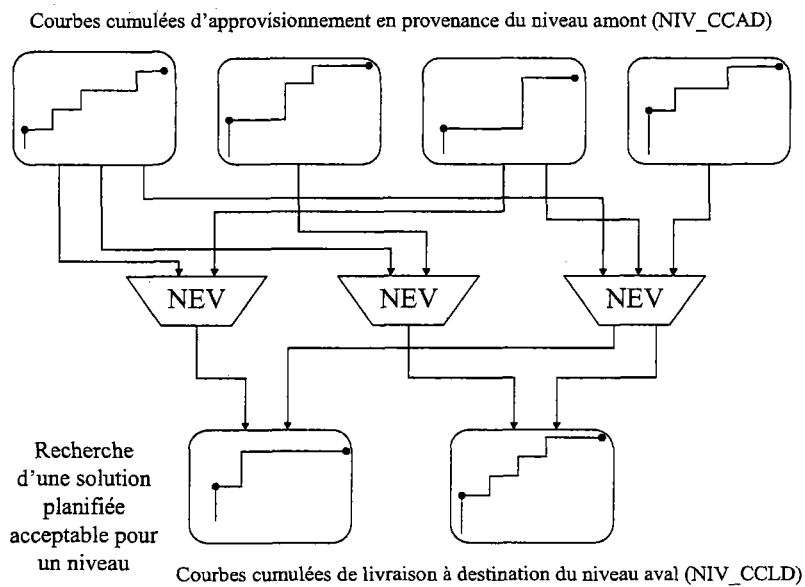


Figure II-4 : Recherche d'une solution planifiée d'un niveau

Une autre donnée à la base des négociations entre niveaux est le **scénario**. Nous définissons un scénario comme étant une succession cohérente de solutions planifiées des niveaux. On distingue des scénarios aval et des scénarios amont. Pour un niveau k donné, un scénario amont est par définition la succession de solutions planifiées compatibles depuis le niveau $N+1$ (niveau des fournisseurs externes) jusqu'au niveau $k+1$, tandis qu'un scénario aval est par définition une succession de solutions planifiées compatibles depuis le niveau 0 (niveau des clients) jusqu'au niveau $k-1$.

2.2.7 Définition du coût d'une solution planifiée et du coût d'un scénario

Le coût d'une solution planifiée d'un NEV est constituée de deux types de coûts : une partie interne et une partie externe.

La partie interne est due aux heures inemployées, aux heures supplémentaires et au coût de sous-traitance.

La partie externe locale du coût d'une solution planifiée est obtenue à partir des pénalités d'avance et de retard par rapport à l'environnement auquel on soumet le NEV.

Nous schématisons le coût d'une solution planifiée par la Figure II-5. Dorénavant, dans tout le chapitre 2, les courbes cumulées en traits minces représentent essentiellement des contraintes d'un problème à résoudre, et celles en traits gras représentent des solutions calculées d'un problème à résoudre ou de décisions à prendre dans un processus faisant intervenir la décision humaine.

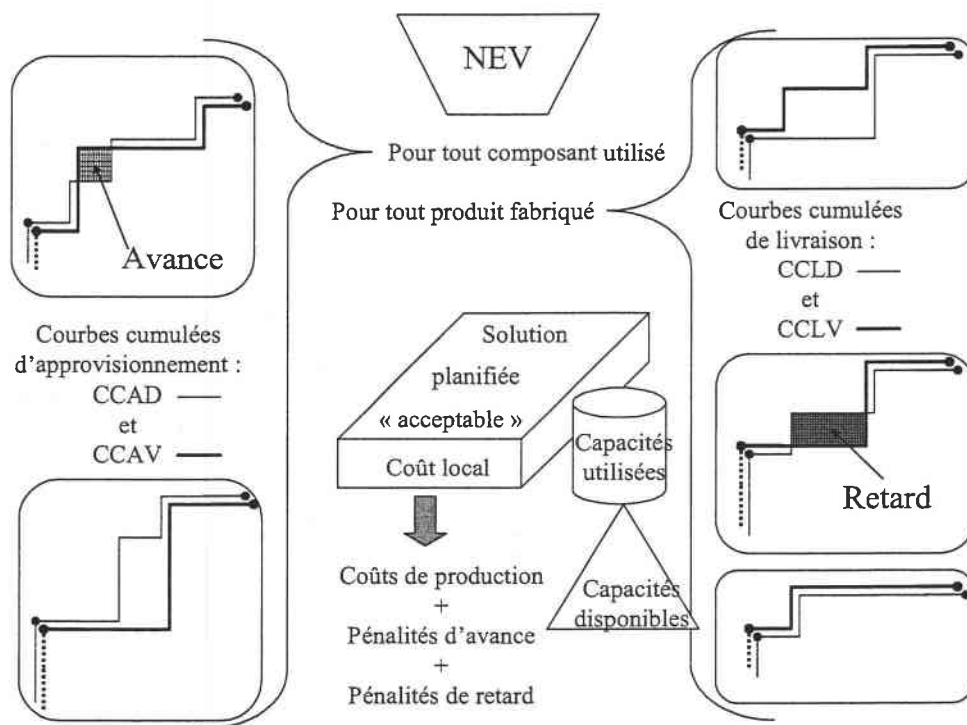


Figure II-5 : Les différents coûts d'une solution planifiée

Quant au coût d'un scénario, nous le définissons comme le cumulé des coûts des solutions planifiées des niveaux (NIV_CCL ou NIV_CCA) depuis le monde extérieur jusqu'au niveau où on

est, en supprimant les pénalités fictives et en les remplaçant par les coûts réels de stockage inter-niveaux.

Par exemple, le coût d'un scénario aval est la somme du coût de retard réel (s'il y en a) à payer aux clients externes, le coût de stockage des produits fabriqués ou achetés en avance et le coût de tous les NIV_CCL de tous les niveaux qui sont à l'aval du niveau étudié.

Nous présentons sur la **Figure II-6** un « scénario aval » de rang k . Tous les plannings des $k-1$ premiers niveaux ont été choisis. Ils sont tous compatibles. Le coût total du scénario aval de rang k est égal au coût du scénario aval de rang $k-1$, augmenté des coûts de production du niveau k ainsi que des coûts de stockage entre le niveau $k-1$ et le niveau k . Les courbes cumulées d'approvisionnement du niveau k (NIV_CCAV) font également partie des données utiles liées au scénario aval de rang k .

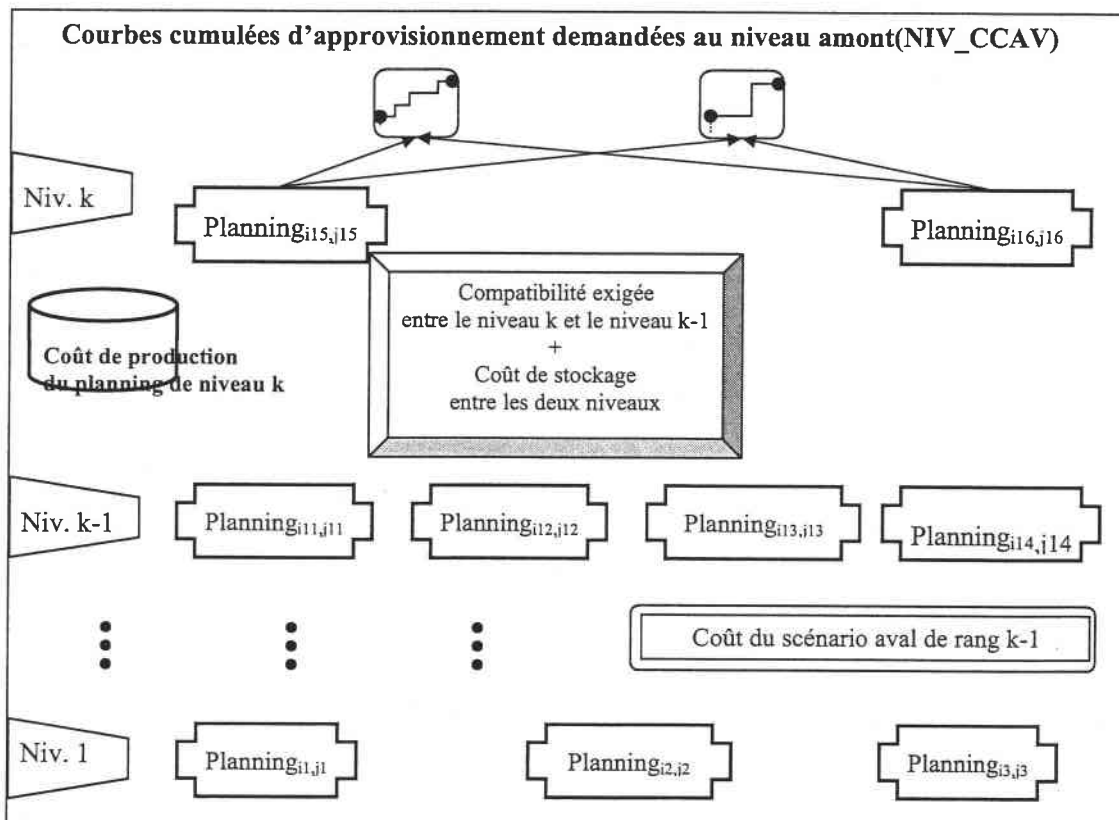


Figure II-6 : Construction d'un scénario aval de rang k

Sur la **Figure II-7**, nous schématisons un exemple de scénario amont de rang k . Tous les plannings des niveaux k à N ont été choisis. Ils sont tous compatibles. Le coût total du scénario amont de rang k est égal au coût du scénario amont de rang $k+1$, augmenté des coûts de production du niveau k ainsi que des coûts de stockage entre le niveau $k-1$ et le niveau k . Les courbes cumulées de livraison du niveau k (NIV_CCLV) font également partie des données utiles liées au scénario amont de rang k .

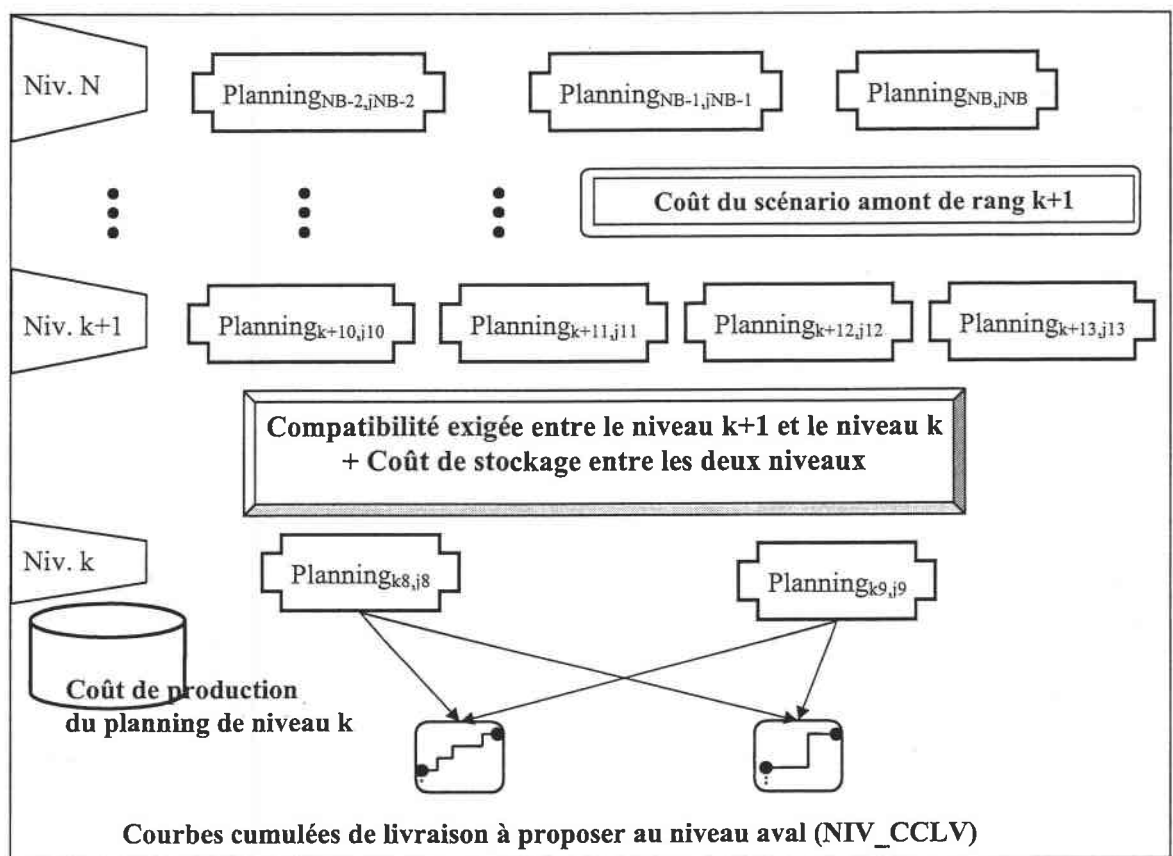


Figure II-7 : Construction d'un scénario amont de rang k

On notera bien que les stocks sont gérés sur le même niveau, c'est-à-dire qu'il y a possibilité d'emprunt de composants entre NEV, ce qui optimise l'utilisation des composants par les partenaires [Gavernini 01].

Dans la suite, on suppose que le coût de stockage des composants est plus intéressant que le coût de stockage des produits finis car les produits finis ont plus de valeur ajoutée.

2.3 Position du problème de la planification de l'EV

Le problème consiste à décrire comment obtenir un planning global faisable de toute l'entreprise virtuelle en élaborant la solution par un processus itératif semi distribué. En effet, l'architecture adoptée par niveaux nécessite d'assurer la cohérence globale en ne contrôlant que localement au niveau de chaque niveau de l'EV. De ce fait, il est primordial que chaque niveau ait la possibilité de constituer et de proposer des scénarios pour ses niveaux amont et aval.

Assurer la cohérence sur chaque niveau de l'EV nécessite la résolution de plusieurs problèmes comme, par exemple, la manière de répartir les différentes contraintes sur les NEV, la gestion des stocks en approvisionnement et en produits finis, la gestion des retards sur un niveau et les manières de choisir une combinaison optimale des propositions des différents NEV.

En suivant la même logique, afin de pouvoir construire des scénarios pour chaque niveau, les NEV de tout niveau doivent être capables de fournir des solutions planifiées en fonction des contraintes qu'on leur impose et de leurs propres contraintes.

Afin de répondre à toutes ces questions, il est primordial de concevoir des modèles à tous les niveaux de l'EV, mais pour des questions de clarté, nous les présentons en allant du plus simple au plus complexe. On commence donc par présenter les modèles locaux de planification de chaque NEV, puis les modèles de niveau et enfin les modèles globaux.

3 Problèmes et modes de fonctionnement d'un NEV

3.1 Problèmes de construction de plannings d'un NEV

On suppose qu'à la précédente période t sur l'horizon glissant, chaque NEV avait des $CCAD_{t-1}$ et des $CCLD_{t-1}$ négociés et cohérents et qu'une période de temps vient de se dérouler. D'éventuels changements peuvent arriver, et ainsi, le NEV dispose de $CCAD_t$ et/ou de $CCLD_t$. le problème du NEV est d'établir ce qu'on a appelé un « planning ». Lorsque la manière de produire est choisie en répondant aux questions quand et comment (quantités produites et sous-traitées), on obtient le planning et on en déduit automatiquement son coût de production local, les pénalités fictives d'avance et où de retard, ainsi que les courbes cumulées amont et aval ajustées au planning (courbes au plus tard pour les approvisionnements nécessaires et courbes au plus tôt pour les livraisons possibles). Nous schématisons la construction d'un planning d'un NEV par la Figure II-8.

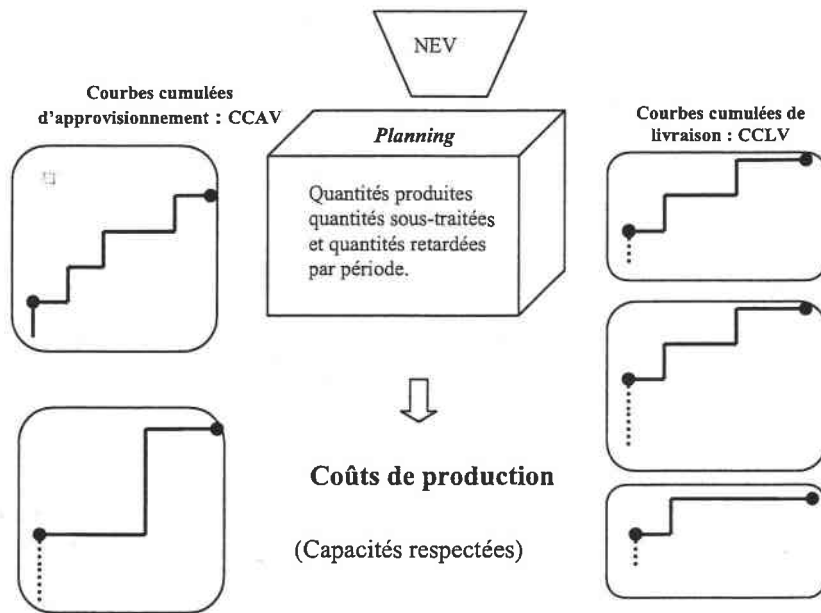


Figure II-8 : Principe de construction d'un planning d'un NEV

En fait, le NEV est sollicité de différentes manières liées à des variations des niveaux amont ou aval. Pour répondre aux différentes sollicitations, le NEV doit pouvoir être capable de construire des plannings selon trois modes.

3.2 Les modes de planification d'un NEV

Le mode de planification d'un NEV exprime l'environnement dans lequel le NEV est sollicité. On distingue trois modes de fonctionnement.

3.2.1 Le mode direct "D"

Avec ce mode, les Courbes Cumulées d'Approvisionnement sont fixées (CCAD) et les Courbes Cumulées idéales de livraison sont données (CCLD), ainsi que des pénalités, par unité de produit et par unité de temps, donnant plus ou moins d'importance aux retards des Courbes Cumulées de Livraisons calculées (CCLV) par rapport aux Courbes Cumulées de Livraisons idéales demandées (CCLD). Sous ces conditions, le NEV doit minimiser les coûts de production et proposer des solutions planifiées ajustées au plus tard en amont et au plus tôt en aval par rapport au planning de production retenu (Figure II- 9).

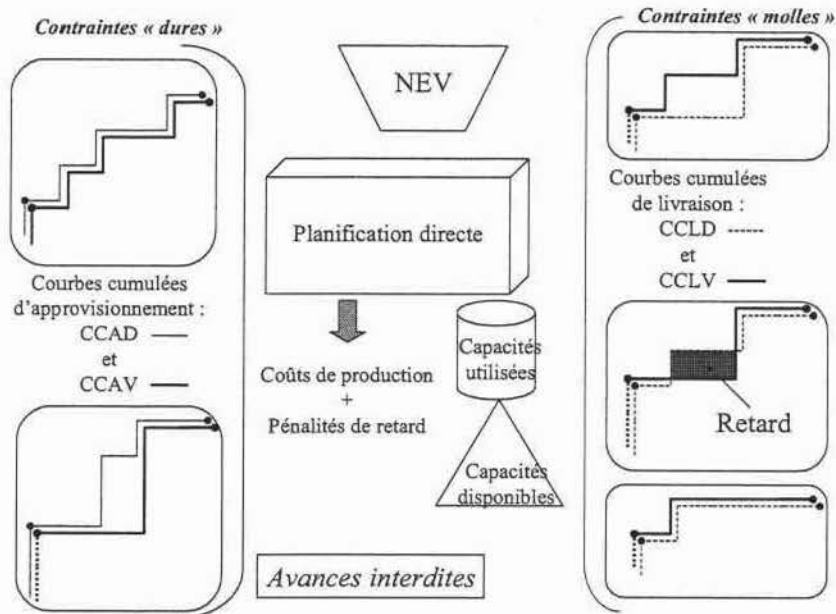


Figure II- 9 : Le mode de planification directe

La figure ci-dessus illustre la construction d'un planning direct dans un environnement donné. C'est-à-dire lorsqu'on accepte des retards, mais pas d'avances par rapport aux contraintes fournies au NEV et que les pénalités de retards cherchent à guider le constructeur de solution planifiée dans le cadre d'une démarche directe.

3.2.2 Le mode Rétrograde "R"

Avec ce mode, les Courbes Cumulées de Livraisons sont fixées (CCLD). Les Courbes Cumulées d'Approvisionnement sont données, ainsi que des pénalités, par unité de composant et par unité de temps, donnant plus ou moins d'importance aux avances des Courbes Cumulées d'Approvisionnement calculées (CCAV). Ces dernières sont déduites du planning proposé par rapport aux CCAD idéales. Comme dans le cas direct, le NEV doit minimiser les coûts de production et proposer des solutions planifiées. Les solutions seront sous forme de propositions de courbes cumulées au plus tard en amont et au plus tôt en aval (Figure II-10).

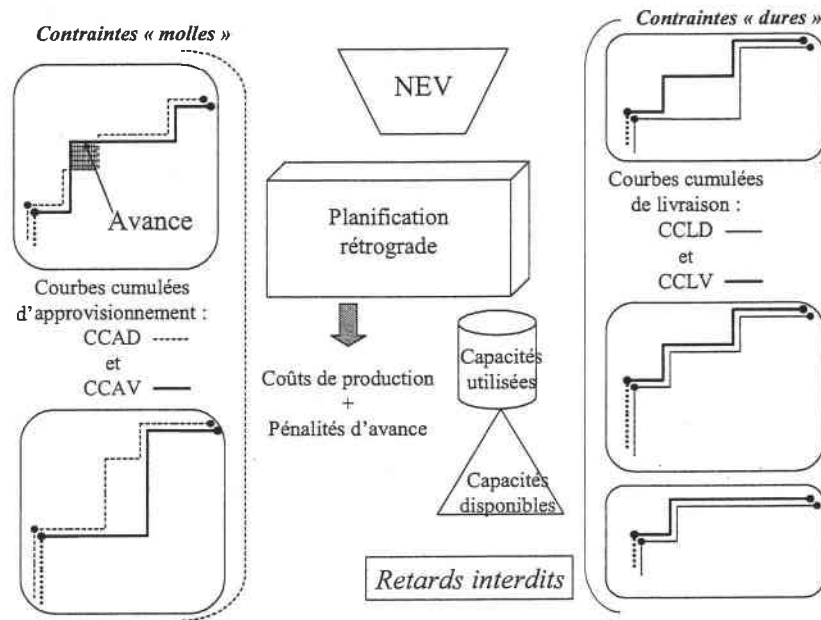


Figure II-10 : Le mode de planification rétrograde

La figure ci-dessus illustre la construction d'un planning rétrograde dans un environnement donné. C'est à dire lorsqu'on accepte des avances, mais pas de retards par rapport aux contraintes fournies au NEV et que les pénalités d'avance cherchent à guider le constructeur de solution planifiée dans le cadre d'une démarche rétrograde.

3.2.3 Le mode Constraint "C"

Dans ce cas, les Courbes Cumulées d'Approvisionnement et Livraisons sont fixées, le NEV cherche si une solution est possible ou non. S'il réussit à construire au moins une solution faisable, alors, il cherche à en construire une de plus petit coût possible. S'il échoue à trouver une solution faisable, alors il envoie simplement une réponse négative signalant l'échec et le processus de coopération et de négociation devra lui fournir un autre environnement de manière à pouvoir trouver des plannings faisables pour cet NEV.

La Figure II-11 illustre la construction d'un planning contraint. C'est-à-dire lorsqu'on n'accepte ni retards, ni avances par rapport aux contraintes fournies au NEV et que l'on pratique donc une démarche de recherche de solution planifiée totalement contrainte. Il est possible que le planificateur ne trouve dans ce cas aucune solution satisfaisante.

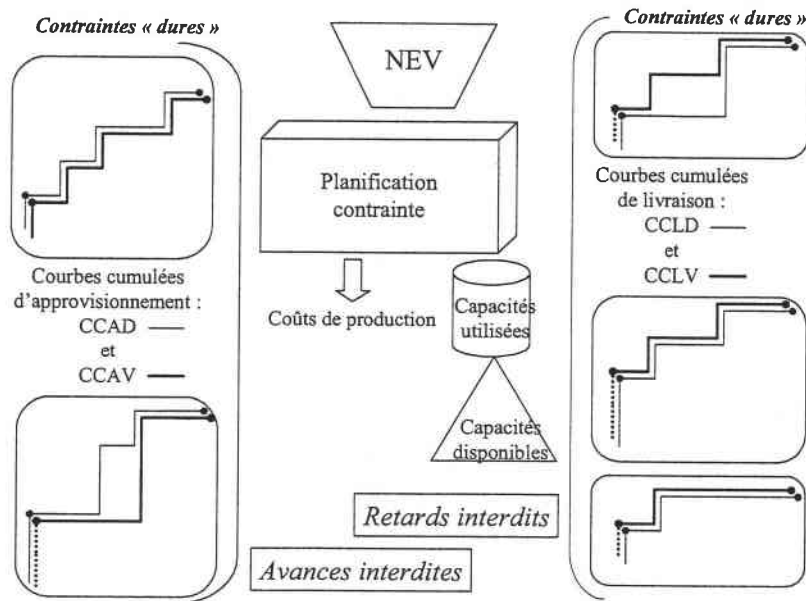


Figure II-11 : Le mode de planification contraint

Avec ces trois modes, trois cas peuvent se présenter pour le planning d'un NEV :

- 1^{er} cas : par rapport au planning établi à la période précédente du plan glissant pour les périodes 1 à T-1, le nouveau planning prévu prend facilement en compte toutes les modifications par rapport aux précédentes prévisions et ces modifications sont raisonnables en terme de coût, pour l'environnement qui est imposé.
- 2^{ème} cas : par rapport au planning établi à la période précédente du plan glissant pour les périodes 1 à T-1, le nouveau planning a difficilement pris en compte les modifications par rapport aux précédentes prévisions et les modifications ne sont pas raisonnables en terme de coût, pour l'environnement proposé. Dans ce cas, le NEV pourra demander des compensations financières, surtout si les nouvelles prévisions sortent des contrats qu'il avait signé dans le cadre de l'entreprise virtuelle.
- 3^{ème} cas : il n'est pas possible de construire un planning, car en raison des capacités limitées en production et en sous-traitance, ou encore parce que les stocks initiaux à l'instant 0 ne permettent pas de satisfaire la période 1, dans ce cas, le nœud ne peut que refuser l'environnement sous lequel on lui demande de construire un planning.

Nous modélisons le problème de construction d'un planning pour un NEV au moyen des modèles de programmation linéaire donnés ci après.

3.3 Les modèles d'établissement de plannings pour un NEV selon le mode de sollicitation

Pour pouvoir répondre aux différentes sollicitations venant de l'amont ou de l'aval, le problème de planification du NEV peut être modélisé par un modèle de programmation linéaire. Le modèle retenu consiste à minimiser les coûts de production soit en production locale soit en sous-traitance, les pénalités de retard, les heures supplémentaires et les heures inemployées. De plus, pour simplifier (très fortement), on suppose que :

- Les produits mettent exactement une unité de temps pour se déplacer entre deux NEV (c'est-à-dire que ce qui est produit, stocké ou déplacé par un NEV pendant la période t peut être utilisé par le NEV suivant pendant la période $t+1$, sans se soucier du moment précis où la transformation est effectuée pendant la période t , alors que le déplacement des flux d'information via Internet est quasi-instantané. Par contre de nouvelles informations sont mises à jour, après d'éventuelles négociations à chaque nouvelle unité de temps.
- Les temps de changement d'outillage sont négligeables.
- La production est effectuée dans des ateliers de production en série (dans le cas des lignes de production parallèles, la capacité des ressources est augmentée en conséquence, modèle agrégé où on ne s'intéresse pas de manière précise à la ligne ou à la machine sur laquelle sera effectivement placée la charge)
- Les processus de production ainsi que les temps d'occupation de chaque produit sur chaque ressource (éventuellement agrégée) est connu. Dans notre cas, ce qui nous intéresse ce sont les entrées du système, les temps de production et les sorties comme produits finis sans nous préoccuper des étapes intermédiaires.

Avec les mêmes notations, nous formulons les deux fonctions objectif de la planification directe et de la planification rétrograde.

3.3.1 Les notations utilisées

- Définition des ensembles

- P : Nombre de produits indexés par p , ($1 \leq p \leq N_p$).
- N_{pi} : Nombre de produits approvisionnés (matières premières) indexés par i .
- N_{pj} : Nombre de produits finis indexés par j , ($N_{pi}+1 \leq j \leq N_p$).
- R : Ensemble des ressources indexé par r .
- T : Horizon de planification.

t_0 : Première période du plan.

- *Les différents coûts pris en compte*

$c_{phu\ j,r}$: Coût de production d'une unité de produit j sur la ressource r .

$c_{ot\ r,t}$: Coût d'une heure supplémentaire sur la machine r pendant la période t .

$c_{sc\ j,t}$: Coût de sous-traitance d'une unité de produit j pendant la période t .

$c_{hu\ r,t}$: Coût d'une heure inemployée sur la machine r pendant la période t .

- *Informations concernant les systèmes de production*

$g_{i,j}$: Quantité de produits i nécessaire pour fabriquer une unité de produit j .

$C_{r,t}$: Capacité normale de production, en heures, de la ressource r pendant la période t .

$b_{j,r}$: Durée de fabrication d'une unité du produit j sur la ressource r

$MaxSC_{j,t}$: Quantité maximale sous-traitée de produits j pendant la période t

$MaxO_{r,t}$: Maximum d'heures supplémentaire sur la ressource r à la période t

- *Informations concernant les propositions des niveaux adjacents*

CCAD_{i,t} : Courbe Cumulée de la période 1 à la période t des Approvisionnements en composants i , courbe Donnée par le niveau amont et correspondant à des choix fait en amont.

CCLD_{j,t} : Courbe Cumulée de la période 1 à la période t des Livraisons en produits j , courbe donnée par le niveau aval et correspondant à des souhaits du niveau aval.

$ctr_{j,t}$: Pénalité de retard unitaire (en €/jour) sur le produit j en retard (livraison en différée) à la période t .

$cta_{i,t}$: Pénalité d'avance unitaire (en €/jour) sur le produit i devant être anticipé par le niveau amont à la période t .

$UST_{j,t}$ = 0 si le NEV n'a pas besoin de fournir les composants aux sous-traitants.

= 1 si le NEV fournit les composants nécessaires à la production des produits j aux sous-traitants.

- Les variables secondaires

CCAV_{i,t} : Courbe Cumulée de la période 1 à la période t des Approvisionnements nécessaires pour le composant i , courbe Variable (calculée par la construction des plannings) (imposée égale à CCAD_{i,t} pour le planning direct).

CCLV_{j,t} : Courbe Cumulée de la période 1 à la période t des Livraisons réalisées pour le produit j , courbe Variable (calculée par la construction des plannings) (imposée égale à CCLD_{j,t} pour le planning rétrograde).

- Les variables de décision

X_{j,t} : Quantité produite de produits j pendant la période t .

SC_{j,t} : Quantité sous traitée de produits j pendant la période t .

O_{r,t} : Nombre d'heures supplémentaires utilisé sur la ressource r pendant la période t .

U_{r,t} : Nombre d'heures inemployées sur la ressource r pendant la période t .

Diff_{j,t} : Nombre de produits j manquant demandés en t ou auparavant.

AV_{i,t} : Nombre de produits i demandés en avance à la période t .

3.3.2 La fonction objectif de la planification directe

Pour tenir compte de l'effet du temps, c'est-à-dire de la fiabilité des données qu'a le NEV, nous introduisons un taux d'actualisation $1/(1+\alpha)^{t-t_0}$, avec α un facteur d'actualisation compris entre 0 et 1.

$$\text{Min} \left[\sum_{t=t_0}^T \left[\frac{1}{(1+\alpha)^{t-t_0}} \left(\sum_{j \in N_{po}} \sum_{r \in R} (X_{j,t} * c_{phu,j,r} + c_{sc,j,t} * SC_{j,t} + c_{tr,j,t} * Diff_{j,t} + c_{ot,r,t} * O_{r,t} + c_{hu,r,t} * U_{r,t}) \right) \right] \right] \quad \text{II- 1}$$

Les contraintes

Les contraintes du modèle de planification sont, pour tout $i \in N_{pi}, j \in N_{po}, t \in T$ et $r \in R$.

$$CCAD_{i,t} \leq CCAD_{i,t} \quad \text{II- 2}$$

$$\sum_{per=1}^t (X_{j,per} + SC_{j,per}) = CCLV_{j,t} \quad \text{II- 3}$$

$$\sum_{per=1}^t \left(\sum_{j \in Npo} (X_{j,per} + SC_{j,per} * UST_{j,per}) * g_{ij} \right) = CCAV_{i,t} \quad \text{II- 4}$$

$$Diff_{j,t} \geq (CCLD_{j,t} - CCLV_{j,t}) \quad \text{II- 5}$$

$$Diff_{j,t} \geq 0 \quad \text{II- 6}$$

$$O_{r,t} \leq MaxO_{r,t} \quad \text{II- 7}$$

$$SC_{j,t} \leq MaxSC_{j,t} \quad \text{II- 8}$$

$$\sum_{j \in Npo} b_{j,r} * X_{j,t} - O_{r,t} + U_{r,t} = C_{r,t} \quad \text{II- 9}$$

$$CCAV_{i,t}, CCLV_{j,t}, O_{r,t}, X_{j,t}, U_{r,t}, SC_{j,t} \geq 0 \quad \text{II- 10}$$

La contrainte II-2 indique que les approvisionnements nécessaires pour la production ne doivent pas dépasser ce qui est proposé par l'AN.

La contrainte II-3 indique qu'à chaque période et pour chaque produit, les courbes cumulées de livraison sont égales à la somme de ce qui est produit en heures normales, en heures supplémentaires ou en sous-traitance.

La contrainte II-4 indique qu'à chaque période t , la courbe cumulée de chaque composant i utilisée dans la production est égale à la somme des besoins en composants de la période 1 jusqu'à la période t .

Les contraintes II-5 et II-6 indiquent que le retard de livraison de chaque produit j à la période t est égal au maximum de 0 et la différence entre ce qui demandé et ce qui est produit.

La contrainte II-7 limite les heures supplémentaires disponibles à une valeur maximale.

La contrainte II-8 limite les quantités sous traitées de chaque produit à une valeur maximale.

La contrainte II-9 assure que la capacité des ressources disponible est égale à la somme des durées opératoires et des heures inemployées moins les heures supplémentaires.

La contrainte II-10 indique que toutes les variables de décision sont positives ou nulles.

3.3.3 La fonction objectif de la planification rétrograde

La fonction objectif de la planification rétrograde consiste à minimiser les coûts de production soit en production locale soit en sous-traitance, les pénalités de retard, les pénalités d'avances, les heures supplémentaires et les heures inemployées.

$$\text{Min} \left[\sum_{t=0}^T \left[\frac{1}{(1+\alpha)^{t-t_0}} \left(\sum_{j \in N_{po}} \sum_{\tau \in R} (X_{j,t} * cphu_{j,\tau} + csc_{j,t} * SC_{j,t} + ctr_{j,t} * Diff_{j,t}) \right) + cot_{r,t} * O_{r,t} + chu_{r,t} * U_{r,t} \right) + \sum_{i \in N_{pi}} cta_{i,t} * Av_{i,t} \right] \right] \quad \text{II- 11}$$

Les contraintes

En plus des contraintes de II-3 à II-10 du modèle de planification directe, la contrainte II-2 sera remplacée par deux nouvelles contraintes (II-12 et II-13) exprimant que les avances d'approvisionnement en tout composant i à chaque période t est égale au maximum de 0 et la différence entre les besoins réels en composants et ce qui proposé par le niveau aval.

$$Av_{i,t} \geq (CCAV_{i,t} - CCAD_{i,t}) \quad \text{II- 12}$$

$$Av_{i,t} \geq 0 \quad \text{II- 13}$$

4 La coordination des NEV d'un même niveau

4.1 Les problèmes des NEV de même niveau

Etant organisés dans le cadre d'une EV, les différents NEV, surtout de même niveau, doivent produire des plannings pour répondre à des nécessités de flexibilité et d'agilité afin d'essayer de faire face aux exigences des niveaux adjacents. Comme pour le cas de la recherche de solutions planifiées d'un NEV, on peut distinguer trois cas pour un niveau : a) celui où on interdit les retards

et où on pénalise les avances ce qui constitue le mode rétrograde pour le niveau, b) celui où on interdit les avances et où on pénalise les retards (mode direct) et enfin c) celui totalement contraint où on interdit avance et retard et où on cherche donc des solutions planifiées compatibles avec les contraintes des niveaux amont et aval.

4.1.1 Problème de répartition de composants entre NEV

Le premier problème à résoudre pour les NEV d'un même niveau est la répartition des composants utilisés et des produits fabriqués par les NEV. En effet, ayant supposé que les stocks sont gérés sur le niveau, lors de la recherche d'une solution planifiée de niveau et si au moins un composant est utilisé par plusieurs NEV, il est nécessaire de répartir les arrivées en composants entre les différentes NEV avant de leur demander de rechercher des solutions planifiées locales compatibles avec les arrivées en composants qu'on leur propose (avec éventuellement des pénalités d'avance si on ne leur fournit pas suffisamment tôt les composants). Nous schématisons ce problème par la Figure II-12.

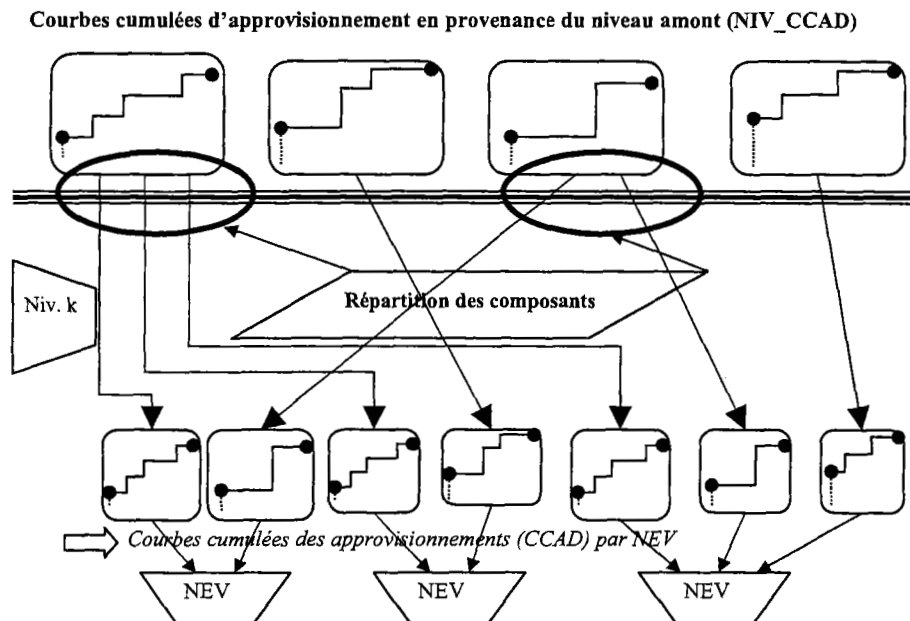


Figure II-12 : Problème de répartition de composants sur les NEV d'un même niveau

4.1.2 Problème de répartition de produits à fabriquer entre NEV

De même, lors de la recherche d'une solution planifiée de niveau et si au moins un produit peut être fabriqué par plusieurs NEV, il est nécessaire de répartir les fabrications de produits entre les différents NEV avant de leur demander de rechercher des solutions planifiées locales compatibles

avec les livraisons de produits (avec éventuellement des pénalités de retard s'ils n'arrivent pas à produire selon les échéanciers qui leur ont été fournis). Dans le cas des entreprises virtuelles les plus simples, on peut supposer qu'un seul NEV fabrique un produit donné et cela simplifie le problème de la constitution d'une solution planifiée de niveau, néanmoins, ceci n'est pas le cas en général. Nous schématisons ce processus par la Figure II-13.

Nous n'avons pas détaillé les processus d'aide à la décision correspondant à la répartition des composants et à la répartition des produits dans le cadre de cette thèse. Nous supposons que des heuristiques simples et empiriques sont utilisées pour cette répartition. Elles peuvent, par exemple fonctionner de la façon suivante pour fournir une première répartition initiale avant négociation et coopération. On partage les produits à fabriquer entre les NEVs au prorata du partage précédemment effectué à la période précédente du plan glissant tout en tenant compte, si possible, des limites de capacités normales de production (hors sous-traitance) des différents NEVs. Dans la littérature, pour des cas pareils, une sorte d'appel d'offres (bidding) utilisant des fonctions d'utilité pour les résolutions des conflits ont été utilisées [Sim et Wong 01], [R.Neubert *et al* 04]. Nous schématisons la problématique de la répartition des produits à fabriquer sur la figure suivante.

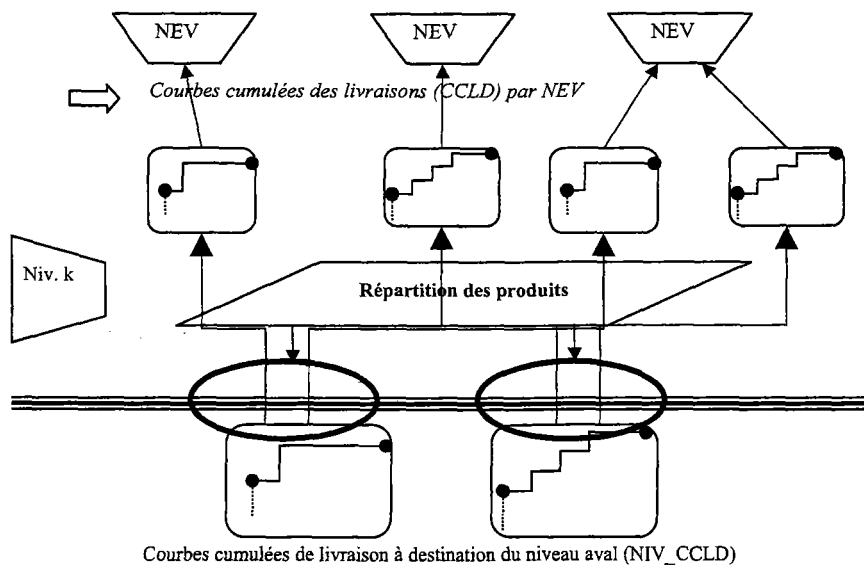


Figure II-13 : Problème de répartition de produits sur les NEV d'un même niveau

4.1.3 Choix des solutions planifiées pour le niveau

Après une répartition des composants et des produits entre les différents NEV, lors de la recherche d'une solution planifiée de niveau, les NEV peuvent construire plusieurs solutions

planifiées plus ou moins intéressantes en fonction des coûts de production locale et en fonction des pénalités d'avance et de retard par rapport aux propositions d'approvisionnement et aux demandes de livraison qui leur sont faites. Pour obtenir une solution planifiée de niveau, il faut retenir un planning correspondant à une solution planifiée de chaque NEV. On en déduit, par regroupement des composants et des produits, des Courbes Cumulées d'Approvisionnement et de Livraison de Niveau réalisées (NIV_CCAV et NIV_CCLV) que l'on pourra ainsi comparer avec les Courbes Cumulées d'Approvisionnement de niveau (NIV_CCAD) demandées par le niveau amont et de livraison de Niveau (NIV_CCLD) demandées par le niveau aval. Ces comparaisons permettent de sélectionner les ensembles de plannings qui paraissent les plus intéressants en terme de coût et de respect des contraintes ou de négocier avec les niveaux amont et/ou aval des changements de courbes cumulées de niveau.

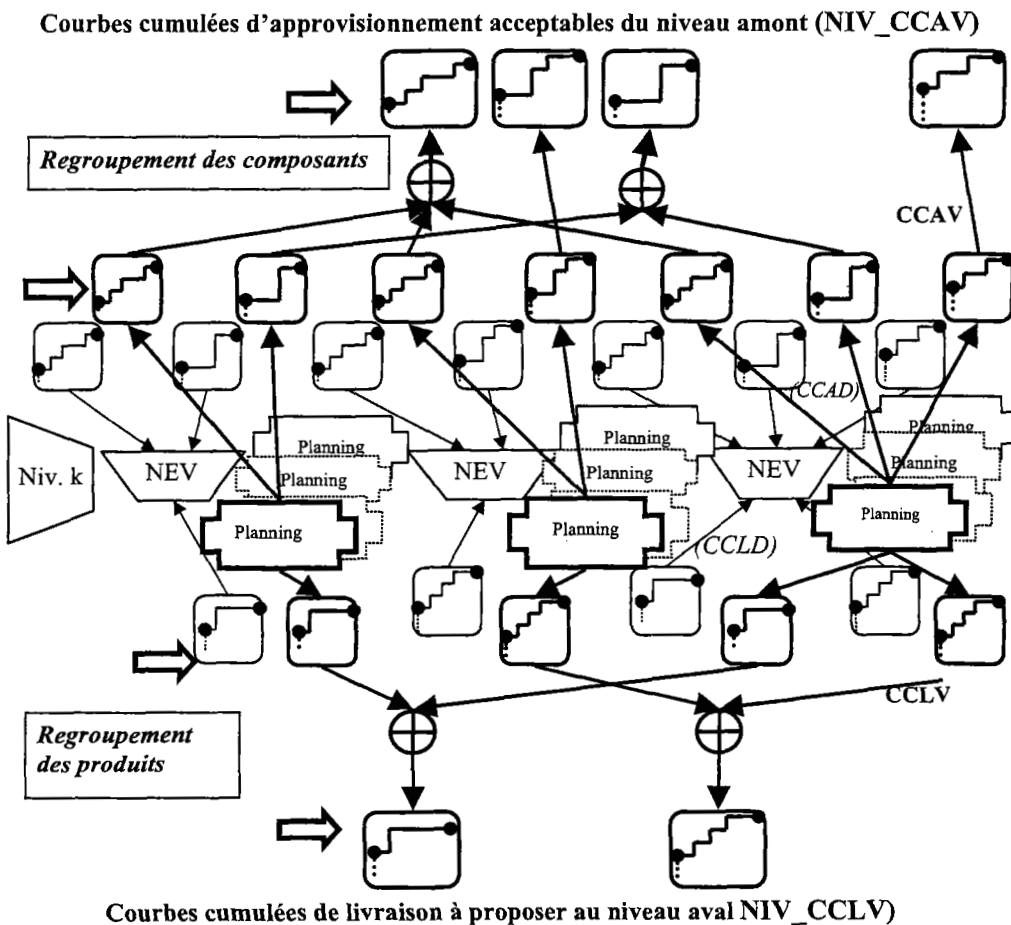


Figure II-14 : Construction de courbes cumulées d'un niveau k

Nous illustrons sur la Figure II-14 la recherche d'un ensemble cohérent de plannings pour un niveau après répartition des produits et des composants entre les NEV. Les données du problème sont donc ici les courbes cumulées amont et aval de chaque NEV. Sous ces contraintes et en changeant les pénalités fictives d'avance/retard, les différents NEVs construisent une série de plannings faisables. Il s'agit de sélectionner un planning par NEV (mis ici en gras). On en déduit les courbes cumulées amont et aval ajustées à chaque planning, qui permettent d'obtenir les courbes cumulées de niveau amont et aval par composant et produit et c'est sur la base de ces courbes cumulées obtenues, des coûts de production locaux et de l'environnement global imposée par les niveaux amont et aval que l'on va pouvoir faire des choix. Le modèle correspondant à ce processus est présenté dans le paragraphe 5.2, après un rappel des coûts de niveaux.

Pour le choix d'une meilleure solution, le calcul de coût s'impose. En effet, les NEV du niveau doivent choisir en principe une solution qui sera la moins coûteuse pour l'ensemble des NEV (surtout si certains se partagent des composants ou fabriquent les mêmes produits).

Courbes cumulées d'approvisionnement acceptables du niveau amont (NIV_CCAV)

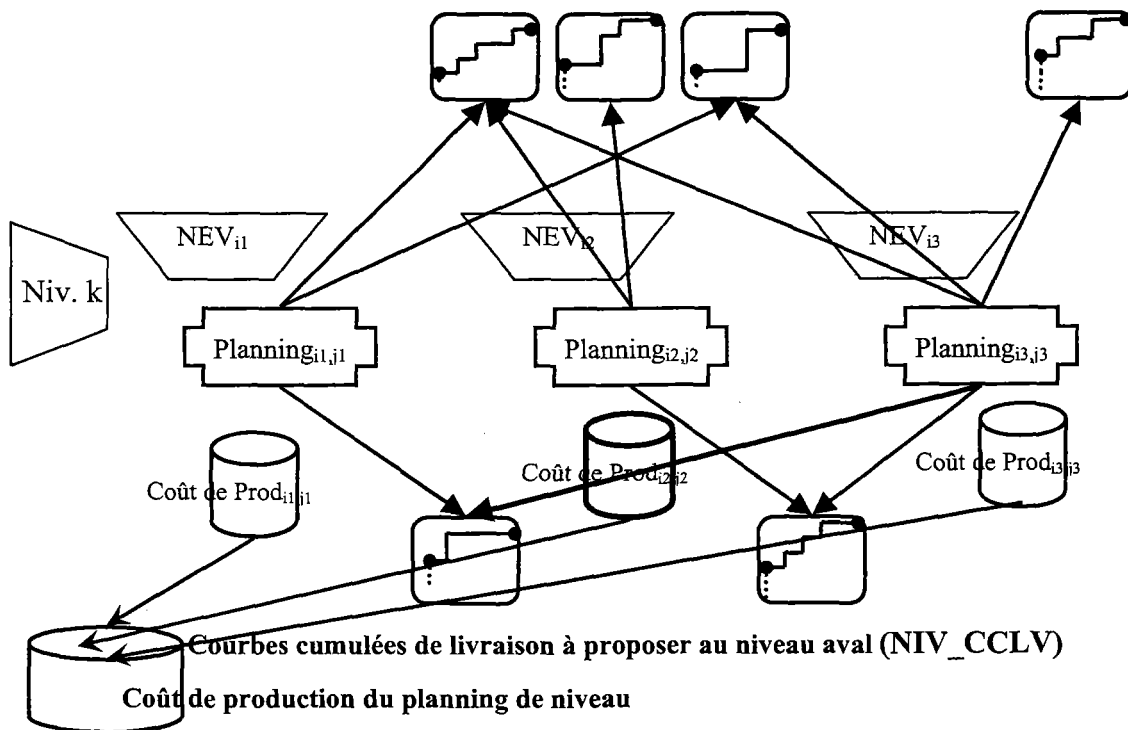


Figure II-15 : Calcul du coût d'une solution planifiée de niveau

Un coordinateur de l'EV sélectionne un planning pour chaque NEV du niveau et obtient ainsi un planning de niveau obtenu à partir de la sélection. Les coûts de production de chaque NEV sont cumulés, ce qui constitue le coût de la solution du niveau. On rappelle que les coûts de stockage sont pris en compte en amont et en aval du niveau mais pas au sein de chaque planning de niveau. Ils sont pris en compte pour la décision inter-niveaux. La Figure II-15 illustre la manière d'obtention du coût d'une solution de niveau.

4.2 Outils d'aide au choix des plannings optimaux pour un niveau

Le problème de choix de plannings optimaux pour l'ensemble des NEV d'un même niveau peut être modélisé par des modèles de programmation linéaire. Les modèles retenus consistent à minimiser les coûts de production globaux du niveau plus les coûts de retard ou d'avance, tout en tenant en compte des stocks de composants et des retards si les NEV planifient en mode direct ou des stocks de produits fabriqués par le niveau et des avances demandées au niveau amont si les NEV planifient en mode rétrograde.

En fait, notre approche consiste à ne prendre en considération pour un niveau qu'un seul coût de stockage, soit celui en amont ou en aval, sauf pour le premier ou le dernier niveau. Dans le cas de la planification en mode direct, chaque niveau tient en compte du stock en amont et le premier niveau tient compte des stocks en amont et en aval ; tandis que pour le cas de la planification en mode rétrograde, chaque niveau tient en compte du stock en aval et dans ce cas, c'est le dernier niveau qui comptabilisera les stocks en amont et en aval.

Les modèles que nous allons présenter concernent un niveau intermédiaire. Dans le cas des niveaux extrêmes, il suffit d'ajuster le modèle.

4.2.1 Les notations utilisées

PF : ensemble des produits fabriqués, en sortie du niveau considéré, indexés par u

PA : ensemble des produits approvisionnés, en entrée du niveau considéré, indexés par v

En : ensemble des nœuds, du niveau étudié, indexés par k

T : horizon étudié

SP_k : ensemble des solutions planifiées proposé par le NEV k . L'ensemble est indexé par sp .

$CLS_{k,sp,u,t}$: courbe des livraisons de produit u pour les périodes de 1 à t si on choisit la solution planifiée sp pour le nœud k

$CAS_{k,sp,v,t}$: courbe des besoins en approvisionnement en produit v , pour les périodes de 1 à t , si on choisit la solution planifiée sp pour le nœud k

$Coût_{k,sp}$: coût de la solution planifiée sp proposée par le NEV k

$CGLS_{u,t}$: solution planifiée retenue du niveau aval, contenant les courbes globales cumulées des livraisons en produit u de la période 1 jusqu'à la période t

$CGAS_{v,t}$: solution planifiée retenue du niveau amont en cumul global des approvisionnements en composants v de la période 1 jusqu'à la période t

$IA_{v,t}$: le niveau de stock en composant v du niveau pour la période t

$IL_{u,t}$: le niveau de stock en produits u du niveau pour la période t

$DiffG_{u,t}$: retard de livraison du produit u à la période t (en tenant compte des compensations entre toutes les solutions sp retenues)

$AvG_{v,t}$: nombre de composants v demandés en avance à la période t (en tenant compte des compensations entre toutes les solutions sp retenues)

$cl_{u,t}$: pénalité de retard unitaire (en €/jour) sur le produit u non livré à temps (livraison en différée) à la période t

$pa_{v,t}$: pénalité d'avance unitaire (en €/jour) sur le composant v avancé à la période t

csa_v : coût de stockage d'une unité de composant v approvisionnée du niveau amont

csl_u : coût de stockage d'une unité de produit u livrée au niveau aval

La variable de décision

$Y_{k,sp} : = 1$ si le NAL choisit la solution planifiée sp pour le nœud k

$= 0$ sinon

4.2.2 La fonction objectif dans le cas du mode direct

Elle consiste à minimiser les pénalités de retard, les coûts des solutions planifiées proposées par les NEV et les coûts de stocks des composants.

$$\text{Min} \left(\sum_{t \in T} \left(\sum_{u \in PF} cl_{u,t} * \text{Diff}G_{u,t} + \sum_{v \in PA} csa_v * IA_{v,t} \right) + \sum_{k \in En} \sum_{sp \in SP_k} \text{coût}_{k,sp} * Y_{k,sp} \right) \quad \text{II-14}$$

Les contraintes :

Pour tout $t \in T$ et pour tout $u \in PF$ et $v \in PA$

$$\sum_{k \in En} \sum_{sp \in SP_k} \sum_{v \in PA} CAS_{k,sp,v,t} * Y_{k,sp} \leq CGAS_{v,t} + IA_{v,t} \quad \text{II-15}$$

$$\text{Diff}G_{u,t} \geq CGLS_{u,t} - \sum_{k \in En} \sum_{sp \in SP_k} CLS_{k,sp,u,t} * Y_{k,sp} \quad \text{II-16}$$

$$\text{Diff}G_{u,t} \geq 0 \quad \text{II-17}$$

$$\sum_{sp \in SP_k} Y_{k,sp} = 1 \quad \forall k \in En \quad \text{II-18}$$

$$IA_{v,t} \geq 0 \quad \text{II-19}$$

La contrainte **II-15** indique que la somme des courbes cumulées en approvisionnement pour le niveau doit être inférieure à la quantité proposée par le niveau amont plus le stock existant.

Les contraintes **II-16** et **II-17** indiquent que la somme des retards de livraison du produit u à la période t par l'ensemble des nœuds est égale au maximum (0, différence entre ce qui demandé et ce qui peut être livré).

La contrainte **II-18** garantit qu'une seule solution planifiée est prise en compte pour chaque nœud.

La contrainte **II-19** vérifie que le niveau de stock global est toujours positif.

Avec les mêmes notations, nous présentons la fonction objectif pour le mode rétrograde. Avec ce mode, le gestionnaire tient compte des avances qui peuvent engendrer des surcoûts pour le niveau.

4.2.3 La fonction objectif du mode rétrograde

Elle consiste à minimiser les pénalités de retard et d'avance, les coûts des solutions planifiées proposées par les NEV et les coûts de stocks en produits fabriqués par le niveau. Elle se présente sous la forme :

$$\text{Min} \left(\sum_{t \in T} \left(\sum_{u \in PF} (cl_{u,t} * DiffG_{u,t} + cs_{u,t} * IL_{u,t}) + \sum_{v \in PA} pa_{v,t} * AvG_{v,t} \right) + \sum_{k \in En} \sum_{sp \in SP_k} coût_{k,sp} * Y_{k,sp} \right) \quad \text{II- 20}$$

Les contraintes :

$$DiffG_{u,t} \geq CGLS_{u,t} - \left(\sum_{k \in En} \sum_{sp \in S_k} CLS_{k,sp,u,t} * Y_{k,sp} + IL_{u,t} \right) \quad \text{II- 21}$$

$$DiffG_{u,t} \geq 0 \quad \text{II- 22}$$

$$AvG_{v,t} \geq 0 \quad \text{II- 23}$$

$$AvG_{v,t} \geq \left(\sum_{k \in En} \sum_{sp \in SP_k} \sum_{v \in PA} CAS_{k,sp,v,t} * Y_{k,sp} - CGAS_{v,t} \right) \quad \text{II- 24}$$

$$IL_{u,t} \geq 0 \quad \text{II- 25}$$

$$DiffG_{u,t} * IL_{u,t} = 0 \quad \text{II- 26}$$

$$\sum_{sp \in SP_k} Y_{k,sp} = 1 \quad \forall k \in En \quad \text{II- 27}$$

Les contraintes II- 21 et II- 22 indiquent que la somme des retards de livraison du produit u à la période t par l'ensemble des nœuds est égale au maximum (0, différence entre ce qui demandé et la somme de ce qui peut être livré et le stock existant).

Les contraintes II- 23 et II- 24 vérifient que les avances d'approvisionnement en tout composant u à chaque période t est égale au maximum de 0 et la différence entre les besoins réels en composants et ce qui est proposé par le niveau amont.

La contrainte II- 25 garantit que le niveau de stock de chaque produit est toujours positif.

La contrainte II- 26 indique que le produit des retards et du niveau de stock est égal à zéro, soit l'un soit l'autre est nul.

La contrainte II- 27 assure qu'une seule solution planifiée est prise en compte pour chaque nœud.

5 Recherche globale semi-distribuée d'un ensemble de plannings cohérents

5.1 Approche itérative semi-distribuée

Rappelons que l'objectif est d'obtenir un ensemble de plannings cohérents via une approche itérative et interactive semi-distribuée.

Les tâches semi-distribuées sont :

- La recherche de solutions planifiées au niveau de chaque NEV, qui, sollicitée selon des environnements différents (y compris les pénalités d'avance/retard), est susceptible de proposer des plannings accompagnés de leur coût de production. Ces plannings sont considérés comme acceptés par le NEV, avec une éventuelle promesse de compensation financière ou non retenus par le NEV, lors des négociations entre le NEV et l'EV (après intervention de décisions humaines). Le nombre de plannings construits pour répondre à des demandes de solutions planifiées est limitée par le NEV pour les mêmes courbes cumulées d'approvisionnement et de livraison en réponse à toute demande de solutions formulées par le niveau auquel appartient le NEV.
- La recherche d'ensemble de plannings cohérents sur un niveau par rapport à un environnement fourni par les niveaux immédiatement adjacents. Rappelons qu'une des décisions importantes à prendre consiste à répartir les composants et les produits à fabriquer entre les différents NEV du niveau. Le contrôle de la convergence de cette recherche est assuré par les procédures utilisées à chaque niveau, où on limite le nombre de solutions de répartition pour lesquels on va demander des plannings.

Les tâches centralisées :

Elles sont liées à la supervision de la succession des recherches de plannings cohérents niveau par niveau. Si on veut obtenir un processus globalement convergent, il faut éditer des règles qui limitent les aller-retour entre les différents niveaux. Il y a de multiples façons de contrôler la convergence du processus. Nous en proposons une ici qui nous paraît intéressante et qui devrait conduire à un ensemble de plannings cohérents. Nous avons ainsi un processus semi-décentralisé convergent.

En cas d'échec ou d'une solution finale peu intéressante, nous supposons que l'ensemble du processus peut être repris complètement avec des pénalités différentes de manière à ne pas

boucler sur les mêmes solutions locales. Néanmoins, on peut imaginer que tous les NEV ont des bases de données locales, ce qui peut leur permettre de réutiliser des plannings déjà construits dans les essais précédents si ces plannings sont intéressants en coût de production et en pénalités d'avance/retard par rapport à l'environnement qui leur est proposé lors de la recherche de nouvelles solutions planifiées.

5.2 Description de l'algorithme de supervision

La base de la méthode consiste, à partir des demandes des clients et du niveau 1, de construire pas à pas, en empilant les niveaux, *des scénarios aval cohérents*. Si l'on parvient à construire ainsi un scénario aval cohérent de rang NR, alors on a obtenu un ensemble de plannings cohérents pour l'ensemble de l'entreprise virtuelle et on le retient si ces coûts sont intéressants. Si les coûts ne sont pas intéressants, comme dit précédemment, on reprend toute la construction, tout en gardant en mémoire dans la base de données des scénarios amont ou aval déjà construits et qui paraissent intéressants et que l'on pourrait reprendre pour compléter éventuellement des solutions partielles.

a) Causes d'échecs dans le processus itératif de construction de scénarios aval lors du passage d'un scénario aval de rang k cohérent vers un scénario aval de rang $k+1$ qui doit être cohérent

Lorsque l'on cherche un ensemble de plannings rétrogrades de niveau $k+1$ cohérents avec les besoins en composants du niveau k pour le scénario aval de niveau k considéré, il y a deux causes possibles d'échec :

- En période 1, on ne peut jamais utiliser que les stocks existants, tout planning cohérent conçu n'utilise jamais plus que les stocks disponible en période 1, mais on peut demander des quantités non limitées en période 2 (et ultérieurement). Ce qui est utilisé en début de période 2 par le niveau k doit pouvoir être fabriqué ou sous-traité en période 1 par le niveau $k+1$. Cela ne sera possible que si les stocks sont suffisants à l'instant 0 au niveau $k+1$. Il y a donc échec si les exigences du niveau k , en prenant en compte le décalage de une période de temps entre le niveau k et le niveau $k+1$, nécessitent de produire ou de sous-traiter en période 1 plus que ne le permet le niveau de stock réel des composants disponible à l'instant 0,
- Pour le niveau N, il y a échec lorsque la courbe cumulée des disponibilités en composants fournis par les fournisseurs ne peut pas permettre de satisfaire les productions demandées par le niveau N-1.

Lorsque nous rencontrons ce type d'échec, nous pouvons agir avec une profondeur plus ou moins importante, mais contrôlée de manière à assurer la convergence de la recherche globale :

- A la profondeur 0, le scénario aval de rang $k-1$ contenu dans le scénario aval de rang k n'est pas remis en question (pas plus, bien sûr que les niveaux inférieurs), mais d'autres ensembles de plannings cohérents sont considérés au rang k (= passage à des scénarios aval voisins) de manière à essayer de supprimer la cause d'échec du rang $k+1$. Le travail peut se faire en mode contraint ou en mode rétrograde non seulement en interdisant les dépassements de la période 1, mais en pénalisant très fortement les dépassements de la période 2.
- A la profondeur 1, le scénario aval de rang $k-2$ contenu dans le scénario aval de rang k n'est pas remis en question (pas plus, bien sûr que les niveaux inférieurs). Nous proposons, avant de déclarer définitivement l'échec, qu'il soit possible de travailler simultanément sur les niveaux k et $k-1$: avec une demande de plannings contraints pour le niveau $k-1$ de manière à essayer de faire disparaître la cause de l'échec des premières périodes des plannings de rang k . Attention, il est très important d'utiliser le mode contraint car cela limite localement la recherche sur les deux niveaux et donc ne fait qu'augmenter le coût local de recherche d'un scénario aval de rang $k+1$ à partir d'un scénario aval de rang k .

b) Gestion d'un échec dans le processus itératif de construction de scénarios aval

Tout échec au niveau $k+1$ nécessite de changer de mode de construction, c'est-à-dire de basculer du mode rétrograde au mode direct.

La courbe cumulée des approvisionnements demandée par le niveau k dans le scénario aval de niveau k est corrigée en fonction des dates au plus tôt où le niveau $k+1$ peut fabriquer ou soustraire compte tenu des stocks disponibles. A partir de ces courbes cumulées, on lance un processus de construction directe de plannings cohérents du niveau k au niveau 1. Ce processus ne peut que réussir, puisque dans le cas des plannings directs, on renvoie les productions que l'on n'est pas capable d'assurer vers le futur. On obtient ainsi un nouveau scénario aval cohérent de niveau k qui sert de base à la construction du scénario aval de niveau $k+1$ et cette fois-ci, la cause d'échec n'existe plus.

Comme il y a au plus une constatation d'échec pour chaque niveau $k+1$ ajouté au scénario aval en cours de construction (et changé au plus une fois après échec au moyen du processus direct), le processus est obligatoirement convergent.

c) Présentation plus détaillée en particulier en ce qui concerne les coûts et les pénalités, les possibilités de reprises différentes à partir de solutions partielles et la maîtrise de la durée de la recherche

Au départ du processus et en raisonnant sur un plan glissant, le coordinateur reçoit le bilan de la période qui se termine. Il connaît donc les stocks à tous les niveaux à l'instant 0 quand il reçoit les nouvelles prévisions en produits finis de la part des clients externes sur les périodes à venir 1 à T.

Dans l'hypothèse où les composants sont fournis aux sous-traitants, il peut, par une méthode MRP à capacités illimitées, vérifier si, sous ces hypothèses très optimistes, il est possible de trouver des plannings cohérents. Dans notre cas où les sous-traitants se fournissent en composants à l'extérieur de l'entreprise virtuelle, on peut supposer que l'on sous-traite le maximum autorisé, et on vérifie si les composants en stock ou ce qu'on peut avoir à la date prévue, sont suffisants pour le reste (mais le test est moins intéressant car il n'est pas assez serré et on va rencontrer moins d'échecs lors du processus de construction)).

Si les tests de conditions nécessaires en composants ne sont pas vérifiés, le coordinateur doit négocier quelques retards par rapport aux courbes prévisionnelles (éventuellement dans la limite des contrats) avec les clients du monde extérieurs.

Ensuite commence la procédure rétrograde itérative,, niveau par niveau, de scénarios aval par construction de plannings rétrogrades (à chaque fois compatibles avec les demandes de l'aval et avec les stocks d'approvisionnement du début de la période 1).

Sur la Figure II-16, nous présentons un exemple de construction d'un scénario de niveau aval de rang 1.

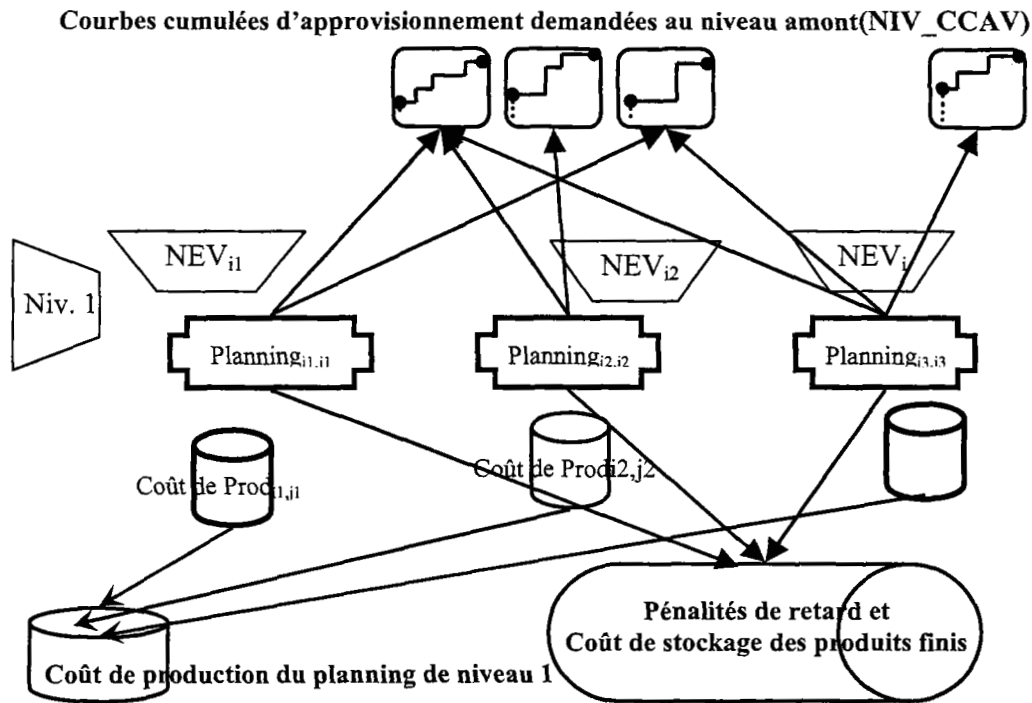


Figure II-16 : Exemple de construction de scénarios aval de rang 1

Quand tous les plannings du premier niveau ont été choisis, on en déduit les coûts en aval égaux aux pénalités de retard par rapport aux clients externes augmentés des coûts de stockage des produits finis terminés en avance.

Lorsqu'on ajoute un niveau, on intègre les coûts de stockage inter-niveaux.

De proche en proche, dans le meilleur des cas, on construit ainsi un scénario aval de rang N, qui est compatible avec les stocks de début de la période 1 (par rapport au dernier niveau, et qui est décalé d'au moins N-1 par rapport aux demandes en composants induites par le planning du premier niveau, avec prise en compte des stocks à tout niveau comme dans la technique MRP). On suppose également que ce planning est compatible avec les courbes d'approvisionnement cumulées acceptables par les fournisseurs externes.

Lors du premier échec au niveau k et uniquement pour le premier échec à ce niveau, éventuellement après avoir fait une tentative de négociation avec le niveau $k-1$ en mode contraint, on détermine des courbes cumulées d'approvisionnement à partir de ce qui était trouvé, mais en respectant les stocks en période 1 et les possibilités des fournisseurs au niveau N et on établit des

plannings directs jusqu'au niveau 1 (en essayant de limiter les coûts de production et les retards par rapport aux anciennes courbes cumulées d'approvisionnement demandées (CCAV), qui deviennent des courbes de livraison souhaitée (CCLD).

Après une construction directe, on obtient obligatoirement un planning faisable (sous réserve de retards acceptables) du niveau 1 au niveau k , c'est à dire un scénario aval de rang k : il contient maintenant les plannings directs.

Le coordinateur peut poursuivre la construction rétrograde à partir de ce scénario aval de rang k .

Lorsqu'il atteint le rang N , il dispose d'une solution (obtenue en mêlant les approches rétrogrades, directes et éventuellement contraintes) complète et faisable. S'il termine par une méthode directe, il se peut que les retards de rang 1 soient devenus inacceptables.

Dans ce cas, il peut conserver un scénario amont jusqu'au rang r et faire construire en pas à pas, par un processus itératif direct, des scénarios amont plus intéressants que les précédents en changeant les pénalités locales de retards pour les composants des produits les plus problématiques (une construction au plus à partir de chaque niveau). Sur la Figure II-17, nous illustrons une construction d'un scénario amont de rang N , qui peut également servir de démarrage pour une construction directe de scénarios amont, mais en calant cette fois-ci les productions au plus tôt ; on augmente les coûts de stockage, il faut donc introduire des *pénalités d'avance* sur les livraisons de produits finis pour avoir des chances d'être bons en matière de coût global.

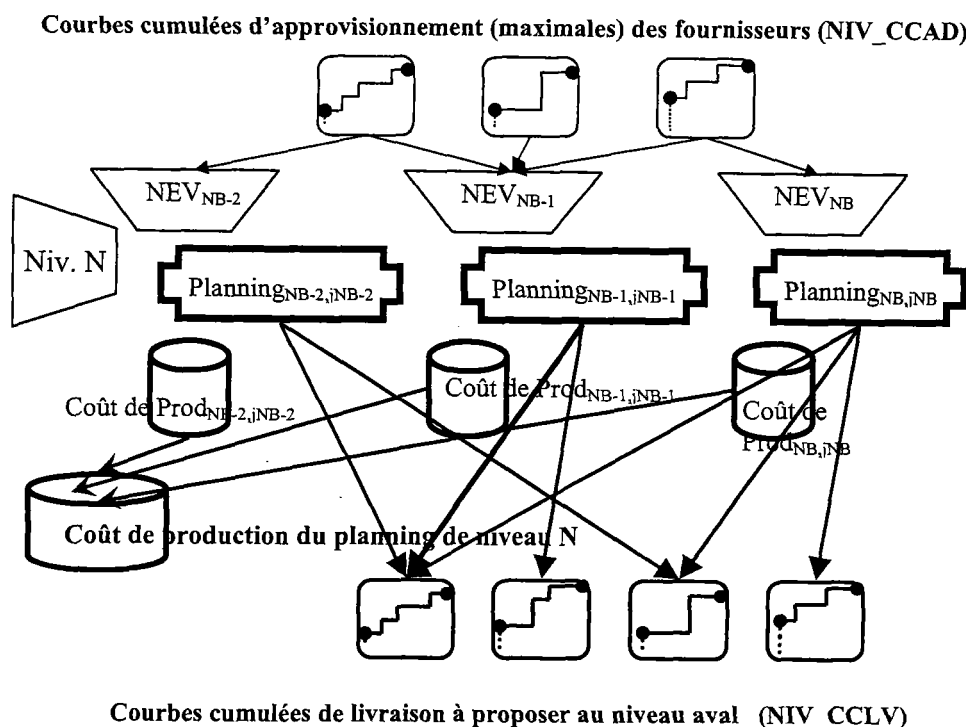


Figure II-17 : Exemple de construction d'un scénario amont de rang N.

Ainsi, nous rappelons que nous limitons dans l'approche, grâce à des paramètres à choisir :

- La durée de calcul de tout planning direct, rétrograde ou contraint,
- Le nombre de jeux de paramètres différents pour ces calculs (soit le nombre de plannings construits) et
- La durée de calcul des procédures de sélection de sous-ensembles de plannings cohérents.

Aussi la recherche de plannings cohérents et « négociés » est obligatoirement convergente et sa durée (en ce qui concerne les calculs effectués sur l'ordinateur) peut être contrôlée et limitée à une durée raisonnable. Par contre, il faudra s'assurer que les agents humains, qui interviennent dans le processus de décision, soient suffisamment réactifs lorsqu'ils sont sollicités.

5.3 Liens avec les autres outils de décision

Un des points clés de la recherche de plannings cohérents est l'aptitude à construire vite des solutions planifiées de moindre coûts pour tout environnement de courbes cumulées amont et aval souhaitées ou imposées, pour tout choix de pénalité et pour tout environnement choisi du système

de production et de sous-traitance. Nous avons modélisé ces problèmes de recherche de solutions planifiées en utilisant des modèles de programmation linéaire en nombres entiers. Mais modéliser n'est pas résoudre. Nous nous intéressons dans la fin de ce chapitre aux méthodes de résolution potentielle, c'est à dire aux outils d'aide à la décision dont on peut pourvoir les NEV.

Parmi les outils de planification utilisables, la solution la plus simple et en même temps la plus sophistiquée consiste à utiliser une méthode exacte de résolution en utilisant un progiciel de programmation linéaire comme, par exemple, CPLEX et un des modèles de programmation linéaire en nombres entiers présentés auparavant. Néanmoins, il est connu que ces progiciels, de complexité exponentielle (la durée de calcul croît de manière exponentielle avec la taille du problème à résoudre), prennent un temps déraisonnable lorsque les problèmes sont de grandes tailles (malgré la rapidité croissante des ordinateurs). Par ailleurs, ce sont des boîtes noires et il est difficile de modifier les solutions en tenant compte de contraintes plus ou moins implicites données par les secteurs de production ou d'expliquer pourquoi on a retenu telle solution plutôt qu'une autre.

Afin d'illustrer les techniques de planification que peut utiliser un NEV, nous présentons un exemple d'algorithme génétique pour la planification rétrograde d'un NEV. En fait, l'objectif de cette thèse n'est pas de développer des méthodes d'optimisation sophistiquées à associer aux différents nœuds pour la construction de plannings cohérents. Néanmoins, nous nous sommes intéressés de manière un peu plus détaillée aux différents outils de prise de décision que peut avoir chaque NEV.

La méthode la plus simple consiste à utiliser des méthodes approchées par construction et éventuellement de les améliorer en utilisant des méta-heuristiques, soit d'amélioration par voisinage [Teghem et Pirlot, 03], soit des algorithmes évolutionnistes [Goldberg, 89]. Nous avons choisi d'utiliser des méthodes simples spécifiques par construction qui peuvent être utilisées seules ou qui peuvent être améliorées en utilisant un algorithme génétique.

6 Construction d'une solution planifiée au moyen d'un algorithme génétique pour un NEV

6.1 Introduction

Les algorithmes génétiques ont déjà été abondamment utilisés dans divers problèmes d'optimisation liés à la chaîne logistique, comme, par exemple, les problèmes de voyageur de commerce, version simplifiée de problèmes de transport et des problèmes de planification de

production [Ozdamar *et al.* 02] . Pour une présentation générale de l'utilisation des algorithmes génétiques pour les problèmes d'optimisation, on peut se référer à [Goldberg, 89] ou [Teghem et – Pirlot, 03]. Notre objectif n'est pas de faire une bibliographie sur l'utilisation des algorithmes génétiques (trop éloignée du thème principal de cette thèse), mais de montrer de manière simple comment nous les avons utilisés pour notre problème de planification. Nous avons programmé cette méthode et nous avons testée la version la plus simple sur un exemple avec deux produits et deux composants.

La popularité des algorithmes génétiques réside en grande partie dans leur simplicité. En effet, pour développer un algorithme génétique, il suffit de choisir :

- comment générer une population initiale diversifiée de solutions
- comment quantifier la qualité de chaque solution
- comment modifier légèrement de manière aléatoire une solution (mutation)
- comment marier deux solutions pour en obtenir d'autre(s) (croisement)

Néanmoins, l'efficacité des algorithmes génétiques dépend de la manière de représenter les solutions (codage) et de la manière de générer de nouvelles solutions, qui, par croisement, doivent donner de bonnes solutions si les solutions croisées sont bonnes et, par mutation, doivent assurer de diversifier une population qui aurait tendance à converger trop vite vers un sous-ensemble d'optima locaux.

Il est possible de développer des algorithmes génétiques pour aider à la décision dans plusieurs parties de notre architecture de construction de plannings cohérents. Nous avons essentiellement étudié comment les utiliser de manière simple, rapide et si possible efficace pour trouver des solutions planifiées pour le NEV.

6.2 Hypothèses du problème de planification à résoudre

Comme nous l'avons expliqué aux paragraphes précédents, l'objectif de chaque NEV est d'optimiser les coûts de production en termes de coûts d'heures supplémentaires, de quantités sous-traitées, d'heures inemployées et d'éventuelles pénalités de retard et d'avance, liées à l'environnement choisi pour la recherche d'une solution planifiée.

Pour atteindre cet objectif, nous avons fait un ensemble de suppositions :

- *hypothèse 1* : on considère au niveau de chaque NEV une seule ressource (dans le cas où il y aurait plusieurs ressources, nous supposons que nous ne planifions qu'une seule ressource supposée être le goulot d'étranglement) ;
- *hypothèse 2* : il s'agit bien d'un problème de planification et non pas d'un problème d'ordonnancement : les inconnues sont des quantités à fabriquer, à sous-traiter et à approvisionner (il s'agit de volumes souvent non négligeables et non pas de quantités presque unitaires) ;
- *hypothèse 3* : tout produit fabriqué en interne coûte moins cher qu'un produit sous-traité ;
- *hypothèse 4* : les composants sont fournis aux sous-traitants et il faut vérifier la faisabilité en examinant la disponibilité des composants ;
- *hypothèse 5* : les nomenclatures sont identiques pour le NEV considéré et pour les sous-traitants ;
- *hypothèse 6* : le nombre de postes ouverts (soit la capacité en heures normales) est fixé a priori pour chaque période, aussi le coût d'ouverture de postes est fixe et n'a pas besoin d'être pris en considération dans la méthode de résolution. Ainsi, le NEV n'a à prendre en compte, pour la recherche d'une solution planifiée soumise à un environnement fixé, que des heures supplémentaires, des heures inemployées et des coûts de sous-traitance et des pénalités, éventuellement fictives d'avance/retard ;
- *hypothèse 7* : pour simplifier, nous présentons uniquement le problème de la planification rétrograde. L'algorithme de planification directe est tout à fait similaire. Pour l'algorithme de planification contrainte, il faut simplement associer des pénalités aux avances/retards relativement plus importantes que les coûts de production, pour essayer d'éviter les solutions non réalisables tout en ne les pénalisant pas trop. Ceci dans l'objectif que les solutions non réalisables proches des solutions réalisables puissent servir de bases à la construction des solutions réalisables de leur voisinage.

Outre les capacités de production et les différents coûts liés à la production, les données du problème à résoudre concernent donc :

- Les CCAD correspondant aux courbes souhaitées pour les approvisionnements en composants, toute avance par rapport à ces courbes sera pénalisée et interdite si elle correspond à la période 1.

- La matrice des pénalités d'avance par période et par composant.
- Les CCLD correspondant aux courbes cumulées demandées pour les livraisons en produits, ici les retards sont théoriquement interdits, donc tout retard qui existerait dans les solutions construites serait très fortement pénalisé par l'algorithme génétique et, s'il réussit, l'algorithme doit rendre une bonne solution sans aucun retard.

6.3 Principes de l'algorithme génétique utilisé par l'AP

Dans notre algorithme génétique, nous utilisons une approche de type codage indirect [Portmann 96]. Dans ce type d'approche, le chromosome ne contient pas une solution du problème, mais un codage qui, en lui appliquant un générateur de solution, va permettre d'obtenir une solution, puis de l'évaluer. Dans la littérature, on appelle « génotype » le contenu du chromosome et « phénotype » la solution correspondante.

Le générateur de solution que nous utilisons est une méthode approchée par construction que nous avons conçue et qui, à partir des contraintes de production, de pénalités et des courbes cumulées amont et aval (CCAD et CCLD), donne une solution (que nous espérons assez bonne en raison des empirismes introduits et des optimisations locales par périodes utilisées). Ce générateur de solution est décrit en section 7.3.1.

Nous utilisons une approche génétique dite « problem space genetic algorithm » qui consiste à perturber l'énoncé du problème [Storer *et al.* 92]. Dans ce type d'approche, on utilise un générateur de solutions et pour changer le résultat du générateur et obtenir des solutions différentes. Au lieu de changer les paramètres du générateur, on change les données du problème. On évalue la qualité du problème généré non pas à partir des données qui ont permis de le trouver, mais à partir des données du problème à résoudre.

Dans le chromosome, nous avons décidé de mettre l'ensemble des courbes cumulées de livraison modifiées aléatoirement et notées CCLDvar (pour variante de CCLD). Toutes les autres données concernant le problème à résoudre sont considérées comme fixées. En appliquant le générateur de solutions qui accepte des avances et exceptionnellement des retards, on obtient un planning avec ses coûts de production ainsi que les courbes cumulées d'approvisionnement et de livraison ajustées au planning (CCAV et CCLV). C'est en utilisant ces dernières courbes et les courbes cumulées d'approvisionnement et de livraison initiales (CCAD et CCLD) que l'on évalue le planning en termes de coût de production, de pénalités d'avance et de pénalités très fortes pour les retards. Ceci

donne la valeur de la fonction objectif associée au chromosome (CCLDvar), qu'il convient de transformer en terme de force (fitness) au sens de l'algorithme génétique.

Pour finir la description de l'algorithme génétique, il faut maintenant préciser :

- Comment on génère de manière aléatoire des courbes cumulées de livraison pour constituer la population initiale,
- Comment on conçoit l'opérateur de mutation qui modifie légèrement les courbes cumulées de livraison,
- Comment on croise les courbes cumulées de livraison pour obtenir de nouvelles courbes cumulées de livraison et
- Comment on organise le schéma général de l'algorithme génétique.

Pour le schéma général de l'algorithme génétique, nous utilisons le schéma le plus classique [Goldberg, 1989], qui fonctionne de la façon suivante :

- a- INITIALISATION : Générer une population initiale P_0 de N individus.
- b- ÉVALUATION : Évaluer la "force" de tout individu de la population P_{k-1} .
- c- SÉLECTION : Sélectionner $N/2$ couples d'individus dans la population P_{k-1} .
- d- CROISEMENT : Avec la probabilité p_c tout couple d'individus est remplacé par un nouveau couple d'individus obtenu en lui appliquant un opérateur génétique de croisement, avec la probabilité $1-p_c$ tout couple d'individus est conservé. (On peut prendre par exemple $p_c=0,75$, c'est-à-dire plutôt grand).
- e- MUTATION : Avec la probabilité p_m tout individu subit une mutation, avec la probabilité $1-p_m$ l'individu est conservé. (On peut prendre par exemple $p_m=0,2$, c'est-à-dire plutôt petit).
- f- la population P_k obtenue remplace la population P_{k-1} .
- g- ARRÊT ? : on reprend en b- jusqu'à avoir effectué un nombre donné d'itérations.

6.3.1 Génération de la population initiale de chromosomes

Il s'agit de construire des courbes cumulées dont chaque valeur est modifiée d'au plus une constante donnée par rapport à la courbe de référence CCLD. On génère par la procédure suivante les chromosomes de la population initiale.

Chaque courbe cumulée CCLvar est obtenue indépendamment pour tous les produits à fabriquer.

Pour tout produit quelconque, nous notons MAXQ la dernière valeur de la courbe CCLD et ΔQ un paramètre lu. Soit CCLMin (resp. CCLMax) la courbe CCLD diminuée (respect. augmentée) de ΔQ , avec les modifications suivantes : toute valeur négative de CCLMin est mise à zéro, toute valeur supérieure à MAXQ de CCLMax est ramenée à MAXQ.

$RESTE = MAXQ$

$CCLvar_0 = 0$

Pour t variant de 1 à $T-1$ faire

% générer l'augmentation de CCQ entre 0 et 1,5 fois l'augmentation moyenne jusqu'à la fin de la courbe %

$Q_t = 1,5 * Uniforme(1, RESTE)/(T+1-t)$;

% ajouter l'augmentation à la courbe %

$CCLvar_t = CCLvar_{t-1} + Q_t$

% corriger la courbe si elle sort des limites retenues %

Si $CCLvar_t < CCLMin_t$

Alors $CCLvar_t = CCLMin_t$

Sinon

Si $CCLvar_t > CCLMax_t$

Alors $CCLvar_t = CCLMax_t$

Finsi

Finsi

% corriger la hauteur des augmentations restantes à faire sur CC %

$RESTE = MAXQ - CCLvar_t$

Finpour t

$CCLvar_t = MAXQ$

(Remarque : comme la dernière valeur de CCLD et de CCLvar est toujours égale à MAXQ qui est une constante pendant tout le déroulement de l'algorithme génétique, la dernière valeur de la courbe n'a pas besoin d'être conservée dans le chromosome, nous la laissons par souci de clarté).

Sur la Figure II- 18, nous illustrons la génération de courbes cumulées CCLvar à partir des courbes cumulées de livraison demandées par le niveau aval.

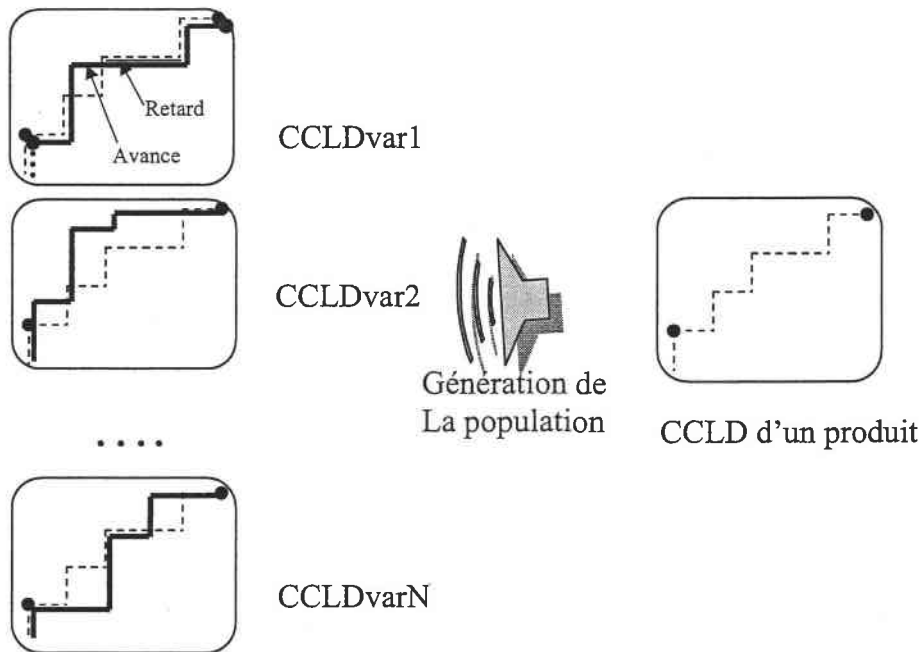


Figure II- 18 : Exemple d'une génération d'un ensemble de solutions à partir d'une CCLD (cas d'un seul produit)

6.3.2 Description de l'opérateur de mutation

On sélectionne de manière aléatoire un produit, une période t entre 1 et $T-2$ et avec la probabilité $\frac{1}{2}$ un sens de variation (croissant ou décroissant).

Soient CCQ_t et CCQ_{t+1} les valeurs, correspondant au produit sélectionné dans le chromosome et $DIFF$ la différence entre CCQ_{t+1} et CCQ_t . On sélectionne de manière aléatoire une variation uniforme entre 1 et $DIFF$. Si le sens de la variation est décroissant (respect. croissant), alors on ajoute (respect. on soustrait) $DIFF$ à CCQ_t et on le soustrait (respect. on l'ajoute) à CCQ_{t+1} . La mutation n'est pas contrôlée par les courbes $CCLMin$ et $CCLMax$ néanmoins les valeurs obtenues doivent rester croissantes et comprises entre 0 et $MAXQ$. C'est pourquoi après la correction, il faut vérifier si CCQ_{t+2} est bien supérieur ou égal à CCQ_{t+1} . Si ce n'est pas le cas, on rend égales à CCQ_{t+1} toutes les valeurs suivantes qui lui seraient strictement inférieures.

6.3.3 Description de l'opérateur de croisement

On considère une paire de chromosomes différents $CCP1$ et $CCP2$ sélectionnés par la technique de la roulette à partir de leur force et on construit deux chromosomes fils $CCF1$ et $CCF2$. Les deux

files sont générés de manière symétrique en inversant les rôles de CCP1 et de CCP2, c'est pourquoi nous n'expliquons que la construction de CCF1, que par mesure de simplification nous notons CCF.

On sélectionne tout d'abord une période t de manière aléatoire entre 1 et $T-2$. Le début des chromosomes est compris entre 1 et t et la fin des chromosomes entre $t+1$ et T .

On répète le traitement suivant pour tous les produits.

On recopie le début de CCP1 et la fin de CCP2 dans CCF. Si CCF_t est inférieur ou égal à CCF_{t+1} , alors la partie de chromosome correspondant à ce produit est correcte sinon le chromosome doit être réparé.

On peut pratiquer la réparation de la manière suivante :

On part de $DEB=t$ et $FIN=t+1$ et on répète les opérations suivantes jusqu'à ce que la courbe CCF soit croissante.

En alternance, faire :

Si $DEB \geq 1$ alors $CCF_{DEB} = \text{Valeur entière de } (CCP1+CCP2)/2$ et $DEB = DEB - 1$

% Vérification si la courbe est ou non croissante (stop éventuel)%

Si $FIN \leq T-1$ alors $CCF_{FIN} = \text{Valeur entière de } (CCP1+CCP2)/2$ et $FIN = FIN + 1$

%Vérification si la courbe est ou non croissante (stop éventuel)%

6.3.4 Passage de la fonction objectif à la force et sélection

La fonction objectif est une somme de coûts réels et de pénalités à minimiser. Il convient donc de passer à une maximisation afin qu'elle devienne la force du chromosome qui doit être d'autant plus importante que le chromosome est considéré comme bon.

Nous utilisons ici la technique des rangs qui consiste à trier les chromosomes par valeurs décroissantes de la fonction objectif et de leur donner dans cet ordre les forces $f(x)$: 1, 2, 3, ...La sélection se fait ensuite par une technique de roulette où la probabilité qu'un chromosome soit sélectionné est proportionnelle à sa force.

6.4 La génération d'une solution approchée de type planning rétrograde à partir d'un chromosome

Le chromosome contient un CCLD, c'est-à-dire la sortie au plus tard des produits vers le client. Il ne s'agit en aucun cas d'un planning. En effet, il faut encore répartir les productions de chaque période et de chaque produit entre production interne et sous-traitance, mais il faut surtout tenir compte des limites de capacité de production et de sous-traitance. L'objectif est d'obtenir une solution qui soit la plus proche possible en fabrication de la courbe CCLD du chromosome et sous cet objectif de construire les solutions les moins coûteuses possibles en coût de fabrication, en coût de sous-traitance et en coût d'avance et si possible de n'avoir absolument aucun retard par rapport à CCLD.

Comme les produits se partagent les capacités de production interne, il n'est pas possible de fabriquer la solution de manière indépendante pour les produits. Pour une méthode par construction, on est donc obligé de construire progressivement la solution soit période par période et, pour chaque période, de décider pour les produits, soit produits par produits pour toutes les périodes. Ce qui a été choisi est la première méthode. On part donc de la période T et on construit la solution en remontant le temps. En cas d'échec car on reporterait la production dans les temps négatifs, on repart de la période 1 pour la partie non placée de la production et on accepte des retards.

On peut découper la procédure de traitement d'une période courante t sur laquelle on voudrait placer les quantités Q_i de produits de type i en deux phases :

Dans la première phase, on vérifie si oui ou non il est possible de tout faire sur la période t .

Si c'est le cas, dans la deuxième phase, on optimise entre ce que l'on produit et ce que l'on sous-traite, globalement sur l'ensemble des produits.

Si on ne peut pas tout faire sur la période t , dans la deuxième phase, on décide ce que l'on avance et ce que l'on laisse à la période courante. Lorsque l'on a décidé ce que l'on avance, on ne dépasse plus les capacités et on peut optimiser les coûts entre ce que l'on produit et ce que l'on sous-traite de la période courante.

6.4.1 Test de faisabilité des quantités Q_i à la période t :

Une **condition nécessaire et suffisante de faisabilité** est la suivante :

On construit la solution (très mauvaise) qui consiste à prendre successivement tous les produits et à poser $SC_i = \max(Q_i, MAXSC_i)$ et $X_i = Q_i - SC_i$, la charge de production correspondant aux Q_i doit être inférieure ou égale à la capacité maximale incluant les heures supplémentaires.

6.4.2 Procédure en cas de faisabilité

Nous supprimons les indices t puisque tout est traité à la période courante t .

a- Notations :

N_{po} : Nombre des produits finis indexés par j .

N_{pi} : Nombre des produits approvisionnés (matières premières) indexés par i .

cot : Coût d'une heure supplémentaire.

csc_j : Coût de sous-traitance d'une unité de produit j .

chu : Coût d'une heure inemployée

$g_{i,j}$: Quantité de produit i nécessaire pour fabriquer une unité de produit j .

C : Capacité normale de production en heures.

b_j : durée de fabrication d'une unité du produit j .

$MaxSC_j$: Quantité maximale sous-traitée en produits j .

$MaxO$: Maximum d'heures supplémentaires.

Q_j : Quantité globale à produire en produits j .

SC_j : Quantité sous traitée en produits j .

X_j : Quantité à produire localement en produits j . ($Q_j = X_j + SC_j$).

O : Nombre d'heures supplémentaires utilisées.

U : Nombre d'heures inemployées.

b- La fonction d'évaluation

Ce modèle est un cas particulier du problème général de la planification d'un NEV présentée au paragraphe 4.3. Nous n'allons pas re-détailler les contraintes du problème puisqu'elles sont les mêmes que celles présentée au paragraphe 4.3 sauf que les variables sont sans indice du temps.

$$\text{Équation 1 : } \text{Min} \left[\sum_j \text{csc}_j * SC_j + \text{cot} * O + \text{chu} * U \right]$$

c- Les contraintes

$$O \leq \text{Max}O \quad \text{II- 28}$$

$$U \leq C \quad \text{II- 29}$$

$$SC_j \leq \text{Max}SC_j \quad \text{II- 30}$$

$$SC_j \leq Q_j \quad \text{II- 31}$$

$$\sum_{j \in N_{po}} b_j * (Q_j - SC_j) - O + U = C \quad \text{II- 32}$$

$$O, U, SC \geq 0 \quad \text{II- 33}$$

Les inconnues primaires sont SC_j et X_j tandis que O et U sont des inconnus secondaires.

Le problème peut être résolu de plusieurs façons : Comme il est plus petit que le problème général, il est plus raisonnable ici d'utiliser un progiciel de programmation linéaire en nombres entiers comme CPLEX ou des outils moins puissants (EXCEL par exemple).

Si les Q_i sont des entiers relativement grands, on peut également utiliser une procédure de programmation linéaire en nombres continus (polynomiale), arrondir à l'entier le plus proche, puis éventuellement corriger quelques variables si des contraintes ne sont pas vérifiées. Cela donne rapidement une solution approchée qui devrait être de bonne qualité.

On peut également utiliser une heuristique comme celle qui suit :

1^{er} cas :

Si $\sum_{j \in N_{po}} b_j * Q_j \leq \text{Max}O + C$ Alors % Si la charge globale induite par la production

% Souhaitée ne dépasse pas la capacité interne

$\forall j \in NP_o \quad SC_j = 0$ % dans ce cas, on ne sous-traite rien

2^{ème} cas :

Si $\sum_{j \in NP_o} b_j * Q_j > MaxO + C$ Alors on utilise l'heuristique **Eval-locale ci-dessous** :

Procédure Eval-locale

Calcul du rapport $ope_j = csc_j/b_j$ pour chaque produit j % On calcule pour chaque produit le rapport coût de sous-traitance sur le temps opératoire sur la ressource considérée%

On suppose que les produits sont re-numérotés par ordre croissant de ope_j

Pour tout $1 \leq j \leq n$ $X_j = Q_j$ finpour % Au départ, on suppose qu'on fabriquera ce qui est demandé%

$i=1, QP = \sum b_i * Q_i$ % On calcule la charge induite si on fabrique ce qui est demandé%

Tant que $(QP > MAXO + C)$ et $i \leq n$ faire % Tant qu'on dépasse la capacité interne%

*Si $b_i * \min(Q_i, MaxSC_i) > QP - MAXO + C$ alors* % Si la surcharge de la ressource reste supérieure au minimum de la quantité à produire en produit i et du maximum à sous-traiter%

$QP = QP - b_i * \min(Q_i, MaxSC_i)$ % On retranche de la charge globale tout ce qu'on peut sous-traiter en produit i %

$X_i = Q_i - \min(Q_i, MaxSC_i)$ % On calcule ce qui peut effectivement être produit en interne en produit i (dans le cas où $MaxSC_i < Q_i$) sinon $X_i = 0$ %

$SC_i = \min(Q_i, MaxSC_i)$

Si non % Si la surcharge de la ressource est inférieure au minimum de la quantité à produire en produit i et du maximum à sous-traiter %

$X_i = \text{partie entière de } ((QP - MAXO - C)/b_i)$

$SC_i = Q_i - X_i$ % On sous-traite ce qui cause la surcharge de la ressource%

Finsi

$i=i+1$

Fin tant que

6.4.3 Procédure en cas de non faisabilité

Il est difficile de savoir quels produits avancés et en quelles quantités, en effet, il faudrait avoir une connaissance plus fine sur les conséquences de l'avance.

C'est pourquoi nous proposons une procédure itérative et aléatoire où nous choisissons à chaque itération un produit et une quantité de ce produit jusqu'à ce que la contrainte de faisabilité soit satisfaite et ensuite nous continuons avec la méthode présentée en a).

Pour tout i , $TQ_i = Q_i$

Tant que la condition de faisabilité n'est pas satisfaite pour TQ faire

Tirer au sort un produit i .

Tirer un nombre aléatoire AV entre 1 et TQ_i

$TQ_i = TQ_i - AV$

Fin tant que

Pour la dernière valeur de i , il est possible que l'on puisse ajuster AV à une valeur plus petite tout en vérifiant la condition de faisabilité. On corrige TQ_i de telle sorte que l'on soit le plus proche possible de la condition de faisabilité.

On corrige la période précédente en lui ajoutant les quantités $Q_i - TQ_i$.

7 Conclusion

Au niveau de ce chapitre, nous avons proposé un ensemble de définitions des données que nous avons utilisées et que nous avons jugé nécessaires pour une modélisation quasi complète des processus de planification au sein d'une entreprise virtuelle. La définition des prévisions et des contrats avec l'extérieur a permis de connaître l'environnement externe de l'EV. De même, les définitions des courbes cumulées, des contrats internes et des modèles de coût utilisés par les partenaires ont permis de savoir l'environnement interne au sein de l'EV ainsi que les objectifs retenus pour une entreprise virtuelle.

Un autre point essentiel du courant chapitre est notre structure de l'EV sous forme de niveaux proposée (qui correspondent aux niveaux de production) et les relations inter-niveaux (clients-fournisseurs) décrivant notre vision de la façon dont une EV devrait marcher.

Pour décrire un processus global de planification de l'EV d'une façon progressive et didactique, nous avons commencé par la description du fonctionnement d'un nœud de l'EV en spécifiant ses différents problèmes de planification et proposant des modèles pour l'atteinte des objectifs imaginés.

Ensuite, nous avons étudié les problèmes de planification sur un niveau et avons décrit et modélisé la coordination entre les nœuds de même niveau. Pour arriver enfin à décrire le processus itératif de planification global de toute la chaîne de production.

Pour la mise en place des modèles de planification interactifs et mettre en évidence l'aspect distribué et centralisé du modèle de planification proposé, en utilisant la négociation et la médiation au sein d'un niveau d'une part, et entre des niveaux adjacents d'autre part, nous allons utiliser l'approche multi-agents. Etant un bon outil pour la modélisation des systèmes industriels coopératifs, les systèmes multi agents ont besoin d'utiliser les nouvelles technologies de communication et d'information.

C'est l'objectif de la prochaine partie, il consiste à modéliser l'architecture proposée par des agents pouvant supporter le processus de planification de l'EV. Tout en étant doté d'outils de décision, les agents utiliseront la négociation et la médiation pour assurer la cohérence de l'ensemble des plannings des NEV.

Chapitre III

L'architecture informatique de l'EV à base des systèmes multi agents

1 INTRODUCTION	105
2 MODELISATION DE L'EV PAR UN SYSTEME MULTI-AGENTS	105
2.1 Architecture globale de l'EV.....	105
2.2 Description des différents agents constituant l'architecture proposée	107
2.2.1 Agent Négociateur et Agent Planificateur du NEV	107
2.2.2 Agent Négociateur du Niveau (NAL)	110
2.2.3 Agent Médiateur (MA).....	111
3 DESCRIPTION DETAILLEE DES FONCTIONNALITES DES DIFFERENTS AGENTS	112
3.1 Agent Planificateur du NEV (AP).....	112
3.2 Agent Négociateur du NEV (AN)	113
3.3 Agent Négociateur de Niveau et Agent Médiateur	113
4 LES FLUX ECHANGES AU SEIN DE L'EV	114
4.1 Les flux d'information	114
4.2 Les flux de matières	116
5 LA NEGOCIATION AU SEIN DE L'EV.....	116
5.1 Hypothèses sur les processus de négociation	117
5.2 La négociation inter niveaux.....	118
5.2.1 Proposition de solutions planifiées de niveau	118
5.2.2 Mission de planification de niveau.....	119
5.2.3 Réponse aux propositions de solutions planifiées de niveau.....	120
5.2.4 Réponse aux missions de planification de niveau	121
5.3 La négociation intra-niveau	122
5.3.1 Mission de planification de NEV	122
5.3.2 Réponse aux missions de planification de NEV.....	123
5.4 La négociation au sein du NEV	123
5.4.1 Mission de construction d'un nouveau planning	123
5.4.2 Mission de construction partielle d'un planning pour certains produits	124
5.4.3 Mission de construction partielle d'un planning pour certaines périodes.....	124
5.4.4 Réponse à une mission de construction d'un planning	125
6 MODELISATION PAR LES STATECHARTS DES DIFFERENTS AGENTS	126
6.1 Introduction	126

6.2 Statechart de l'Agent Planificateur	126
6.3 Statechart de l'Agent Négociateur	127
6.4 Statechart de l'Agent Négociateur de niveau	129
7 LA MEDIATION AU SEIN DE L'EV	131
7.1 Introduction	131
7.2 Les principaux états du MA	131
8 CONCLUSION	132

1 Introduction

Pour la modélisation et la mise en œuvre de l'entreprise virtuelle, il nous semble que les systèmes multi-agents constituent une réponse très intéressante pour assurer une planification interactive dans laquelle l'aspect humain et les systèmes automatiques peuvent coexister et décider ensemble.

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé l'aspect décisionnel pour aboutir à l'élaboration d'un planning global d'une EV. Dans ce chapitre, on s'intéresse plus à la modélisation de l'architecture en utilisant les systèmes multi-agents (SMA) tout en se focalisant d'une part, sur les données et les communications entre agents et d'autre part, sur les comportements des différents agents en fonction des environnements auxquels ils seront sollicités.

L'architecture proposée dans ce chapitre s'appuie sur des travaux antérieurs au laboratoire concernant le pilotage des systèmes de production par des systèmes multi-agents [Roy99], [Vernadat et al. 98], du projet NETMAN du centre Centor de l'Université Laval [D'amours et al. 99] et d'un certain nombre de travaux récents décrits dans la littérature. Il s'agit d'une architecture qui se situe entre les architectures hiérarchisées et les architectures distribuées pour le pilotage des systèmes discrets [Dilts et al. 91]; [Huguet et Grabot 95].

Les agents représentent les NEVs (ou des parties de NEV) constituant l'entreprise virtuelle. Les agents, se partageant les différentes informations, peuvent assurer la cohérence des plannings et donc un bon fonctionnement de l'architecture. Dans le cas de conflits entre niveaux (NEVs), un agent médiateur décidera pour l'ensemble et veillera à la bonne conduite de l'algorithme de supervision. La co-décision entre agents est réalisée par négociation.

2 Modélisation de l'EV par un système multi-agents

2.1 Architecture globale de l'EV

A partir de la décomposition de l'EV en niveaux ainsi que du modèle global de planification proposé, nous retenons qu'en cas d'incohérence des plannings des NEV (chose qui arrive très souvent dans le cas des chaînes logistiques) un coordinateur, que nous appellerons par la suite le médiateur, intervient, sur plusieurs itérations, pour assurer la cohérence depuis le premier niveau jusqu'au dernier.

Pour alléger le rôle du médiateur, nous avons jugé préférable de mettre en place un agent pour chaque niveau (NAL). Ce dernier va être chargé d'assurer tout d'abord la cohérence des solutions planifiées des NEV d'un même niveau et ensuite négocier avec les niveaux adjacents en cas d'incohérence entre les solutions planifiées de niveau et les scénarios proposés par l'amont ou par l'aval. Cependant, dans le cas où le processus de négociation inter-niveaux n'aboutit pas, alors l'intervention de l'Agent médiateur (MA) s'avère nécessaire (Figure III-1).

Ainsi, à la différence de plusieurs autres travaux sur la coordination des systèmes multi-agents dans les chaînes logistiques (détaillé en chapitre I), nous adoptons la négociation et la médiation pour coordonner les plannings des différents agents représentant les NEV.

En outre, nous proposons que le comportement de chaque NEV soit modélisé par deux agents :

- un Agent Planificateur (AP) : utilisé pour établir la planification de NEV avec différents paramètres (coûts, pénalités...) et en fonction des modes de planification auxquels il sera sollicité, il peut prendre plusieurs états,
- un Agent Négociateur (AN) : qui gère la négociation avec l'Agent Négociateur de son Niveau (NAL). Il transmet les ordres (CCAD ou CCLD) à l'Agent Planificateur en lui précisant des modalités de planning et en fonction des réponses de l'AP (CCLV, CCAV).

Ce choix de modèle du NEV permet de séparer les négociations et la planification au sein de chaque noeud. En effet, avec notre architecture, chaque NEV est indépendant pour ce qui concerne la gestion de sa production et son porte-feuille de commandes en fonction des capacités de production dont il dispose. Par contre, le problème de la disponibilité des composants est géré par le gestionnaire du niveau (NAL) qui permet de répartir les composants sur les NEV qui utilisent les mêmes composants en fonction des solutions planifiées proposées.

L'EV est ainsi modélisée par un système multi-agents où chaque agent emploie un système de négociation coopérative pour établir une planification globale et cohérente. Dans le cas de non convergence des négociations bilatérales, le médiateur prend en charge la prise de décision et le suivi du bon déroulement du processus de planification, tel que détaillé au chapitre II.

L'architecture globale de l'entreprise virtuelle avec des systèmes multi-agents se présente comme l'indique la Figure III-1.

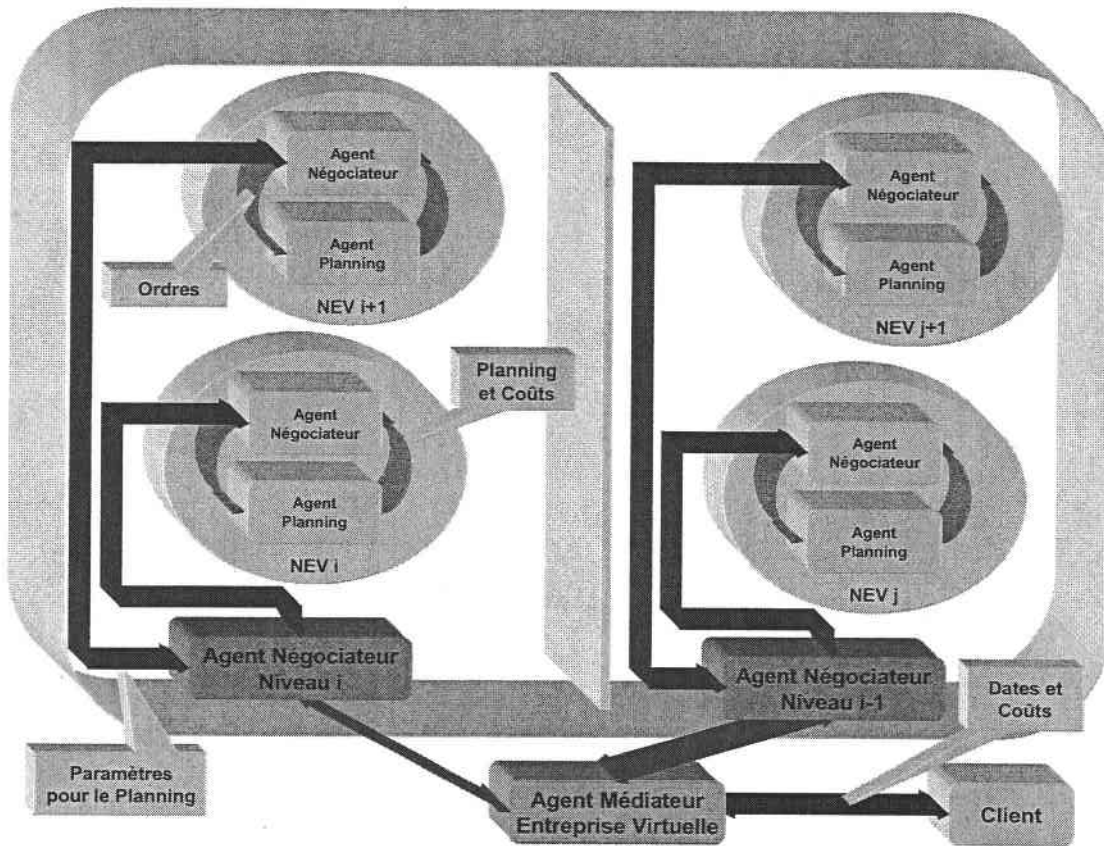


Figure III-1 : Modèle de l'entreprise virtuelle par des systèmes multi-agents

2.2 Description des différents agents constituant l'architecture proposée

2.2.1 Agent Négociateur et Agent Planificateur du NEV

a) Problèmes à résoudre

En général, chaque NEV est confronté à un ensemble de contraintes internes liées à ses limites de capacité et à un ensemble de contraintes externes :

- Soit de la part des nœuds aval (clients internes) ou des clients externes exigeant des livraisons dans les délais avec le moindre coût et avec la qualité demandée,
- Soit de la part des nœuds amont (fournisseurs internes) ou des fournisseurs externes qui ont eux aussi des contraintes de délais de production et de coûts.

Pour faire face aux modifications de courbes cumulées de l'amont ou de l'aval et par rapport au planning établi à la période précédente du plan glissant pour les périodes 1 à T-1, le NEV, plus précisément son AP, peut se trouver confronté à différentes situations :

- le planning prévu peut prendre en compte toutes les modifications par rapport aux précédentes prévisions, ou sans problème, ou en fournissant des efforts additionnels (par exemple en utilisation des heures supplémentaires ou la sous-traitance).
- Le planning prévu est faisable sauf pour certains produits. Dans ce cas, on lui demande de construire une nouvelle solution planifiée complète en se basant sur le planning préalable et en corrigeant seulement les produits en question.
- Le planning prévu est faisable sauf pour certaines périodes. Dans ce cas, on lui demande de construire une nouvelle solution planifiée complète en se basant sur le planning préalable et en corrigeant seulement un sous-ensemble contigu de périodes.
- Le planning prévu n'est pas faisable. Dans ce cas, on lui demande d'établir un nouveau planning.

Ainsi, l'AP établit les plannings et teste la faisabilité des différentes propositions que l'AN lui fait. Il peut agir selon différents modes en fonction de l'environnement qu'on lui impose (direct, rétrograde ou contraint). Pour la prise de décision, l'AP doit disposer d'outils lui permettant d'établir des réponses aux sollicitations de l'AN (cf. § 4.3, chap. II).

Quant à l'Agent Négociateur (AN), il s'occupe de faire des bilans financiers du NEV en testant à chaque négociation les différents coûts et surcoûts et les gains engendrés par les propositions du NAL d'une part, et celles de l'Agent planificateur (AP) d'autre part. Il établit donc le modèle de coût local du NEV en essayant de maximiser sa marge locale. Ainsi, il accepte des scénarios si le total des gains sur un horizon moins les pertes est supérieur à un certain seuil (par exemple, le pourcentage du chiffre d'affaires).

La figure III-2 présente le processus de planification et de négociation entre l'AN et l'AP au sein du NEV.

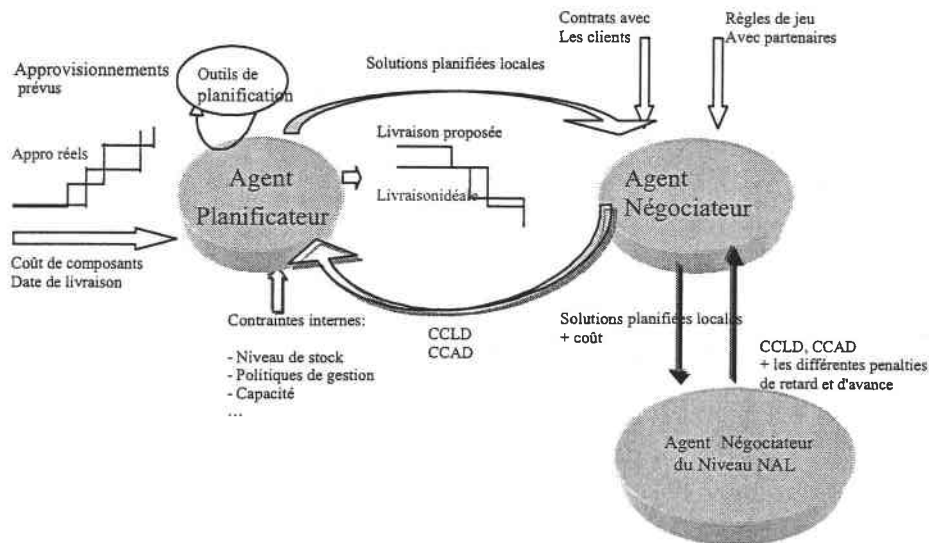


Figure III-2 : Processus de planification et de négociation d'un NEV

b) Modes de fonctionnement de l'AP

L'Agent Planificateur sera sollicité de différentes manières en fonction du niveau avec lequel le NAL négocie via l'AN. Il doit permettre trois modes de fonctionnement :

- **Rétrograde "R"** dans le cas de la négociation amont. Avec ce mode, les Courbes Cumulées de Livraison sont fixées tandis que les Courbes Cumulées d'Approvisionnement sont négociées avec le niveau amont (pénalités, notion d'avance). Sous ces conditions, l'AP doit minimiser les coûts de production et proposer des solutions planifiées. Les solutions seront présentées sous forme de propositions de courbes cumulées au plus tard en amont et au plus tôt en aval.
- **Direct "D"** dans le cas de la négociation aval. Avec ce mode, les Courbes Cumulées d'Approvisionnement sont fixées tandis que, les Courbes Cumulées de Livraison sont négociées avec l'aval avec des pénalités (notion de retard). Sous ces conditions, l'AP doit minimiser les coûts de production du NEV et proposer aussi des solutions planifiées au plus tard en amont et au plus tôt en aval.
- **Contraint "C"**. Dans ce cas, les Courbes Cumulées d'Approvisionnement et de Livraison sont fixées. Il n'y a plus de possibilité de négocier. L'AP cherche si une solution est possible

ou non. Si oui, il cherche alors la solution optimale, sinon il passe au mode direct ou rétrograde en fonction des flexibilités des niveaux amont et aval.

2.2.2 Agent Négociateur du Niveau (NAL)

a) Problèmes à résoudre

Vu que, d'une part, le principal problème de planification de la production d'une entreprise X est d'être sûr que tous les fournisseurs livrent à temps et qu'un retard au niveau d'un simple fournisseur peut influencer le déroulement de la production de toute l'entreprise et que, d'autre part, le problème se complique de plus en plus lorsqu'il s'agit d'un ensemble d'entreprises qui ont des fournisseurs en commun, nous avons jugé nécessaire d'introduire un coordinateur pour chaque niveau de production.

En effet, si un ensemble de NEV doivent négocier en même temps avec des fournisseurs et des clients, le processus de négociation devient cyclique et il est difficile de le faire converger. Ceci justifie le rôle de l'Agent Négociateur du Niveau (NAL) qui tout d'abord coordonne les NEV de son niveau et, ensuite, négocie avec les NAL des niveaux amont et aval adjacents concernés (Figure III-3). Après avoir réparti les composants sur les nœuds utilisant les mêmes composants et qui peuvent être en conflit, la complexité du NAL réside dans son rôle à faire sortir des choix de solutions planifiées pour son niveau en fonction d'un mariage optimal entre les solutions planifiées du niveau proposées par le niveau aval (clients) et les solutions planifiées du niveau proposées par le niveau amont (fournisseurs).

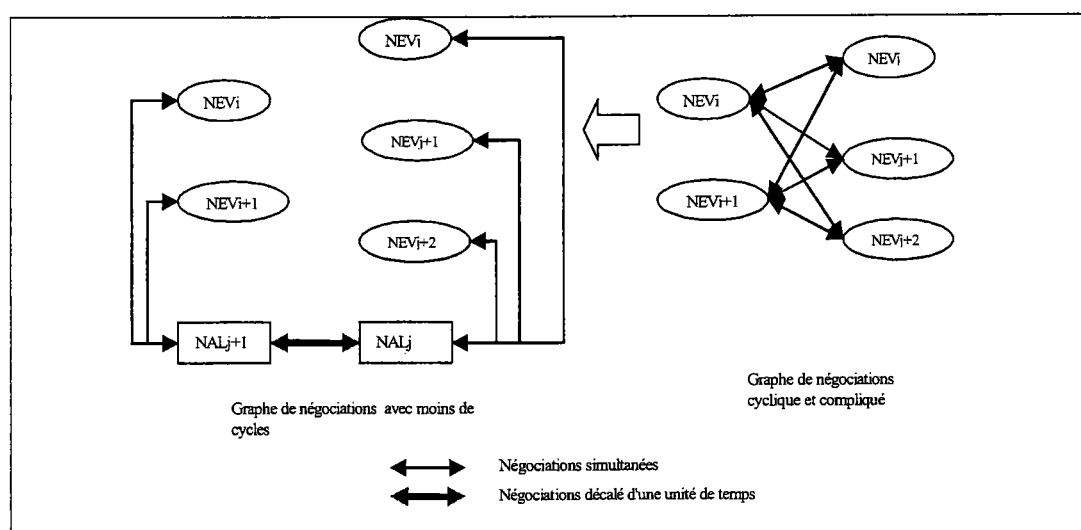


Figure III-3: Rôle du NAL

b) Mode de fonctionnement du NAL

Comme pour les NEV, nous distinguons trois modes de fonctionnement du NAL. Chaque mode correspond à un type de négociation dans lequel se trouve le NAL avec les niveaux adjacents. Quand le NAL entre en négociation avec l'aval (c'est-à-dire qu'il fixe les conditions à l'amont), il se met en mode **Direct**. Tandis que lorsqu'il négocie avec le niveau amont, il se met en mode **Rétrograde**. Quand une négociation s'achève et que le NAL doit renégocier avec l'autre niveau, il se retrouve dans le mode **Contraint**. Nous explicitons les trois modes :

- **Rétrograde "R"** : Avec ce mode, les courbes cumulées globales de livraison sont fixes tandis que les courbes cumulées globales d'approvisionnement sont pénalisées (notion d'avance). Sous ces conditions, le NAL doit pouvoir premièrement répartir les demandes en produits sur les NEV en conflit, puis sélectionner les solutions planifiées de ses NEV assurant le moindre coût pour le niveau. Les solutions seront présentées sous forme de propositions de courbes cumulées globales au plus tard en amont et au plus tôt en aval.
- **Direct "D"** : Avec ce mode, les courbes cumulées globales d'approvisionnement sont fixées tandis que les courbes cumulées globales de livraison sont pénalisées (notion de retard). Sous ces conditions, le NAL doit pouvoir premièrement répartir les composants sur les NEV en conflit, puis sélectionner les solutions planifiées de ses NEV assurant le moindre coût pour le niveau.
- **Contraint "C"** : Dans ce cas, les courbes cumulées globales d'approvisionnement et de livraison sont fixées. Le NAL cherche une solution pour le niveau avec les solutions planifiées de ses NEV. S'il y a possibilité d'une solution, il cherche alors la solution optimale qui ajuste ce que propose les niveaux adjacents et ce que peut faire les NEV, sinon il passe au mode direct ou rétrograde en fonction des flexibilités des niveaux amont et aval.

2.2.3 Agent Médiateur (MA)

Etant coordinateur de toute la chaîne, les problèmes du MA sont multiples. D'une part, il permet de court-circuiter le premier et le dernier niveaux en gérant l'ensemble des ventes et par la suite l'ensemble des approvisionnements. En effet, vu les problèmes de transfert d'information depuis les clients jusqu'aux fournisseurs et la dégradation d'informations qui peut être engendrée, le MA, en utilisant la méthode MRP à capacité infinie, sélectionne les produits avec haute valeur ajoutée pour l'EV et choisit les fournisseurs proposant les meilleurs prix.

Une autre fonction du MA, qui reste la principale, est de veiller sur le bon déroulement du processus de planification itératif et par niveau. En cas de conflits entre deux niveaux, le MA intervient pour choisir les courbes cumulées d'approvisionnement qui sont les plus compatibles avec les courbes cumulées de livraison.

En résumé, l'objectif du MA est d'une part de satisfaire les clients en minimisant les coûts de retard et, d'autre part, de choisir les scénarios conduisant au minimum de coûts.

En outre, nous supposons que le MA dispose d'une base de données où sont enregistrés les niveaux et les NEV pénalisés pendant les périodes précédentes. Par conséquent, un même niveau ou un même nœud ne sera pas tout le temps pénalisé. Cette base sera consultable aussi par les agents négociateur des niveaux.

3 Description détaillée des fonctionnalités des différents agents

La description de chaque agent consiste à détailler sa définition en précisant les caractéristiques liées à ses fonctionnalités et sa logique de fonctionnement.

3.1 Agent Planificateur du NEV (AP)

En fonction du type de système de production de chaque NEV, nous distinguons différents types d'agent planificateur. Du point de vue de la planification de la production, le système de gestion reste tributaire de plusieurs facteurs tels que les ressources disponibles et les stratégies de gestion. La modélisation d'un système de production peut donc se faire comme étant :

- Système à une machine ;
- Système à plusieurs machines.

Pour la gestion de son système de production, on associe à chaque AP un certain *niveau d'intelligence* défini par l'ensemble des outils d'aide à la décision servant à la planification de la production du NEV. Dans une EV, il existe de nombreux agents avec différents niveaux d'intelligences entre autres :

- Des agents simples (*AP_simple*) où les procédures de planification utilisent des règles simples de priorité.

- Des agents plus ou moins simples (*AP_MA*) utilisant des règles de priorité complétées par des essais d'amélioration et l'utilisation de méthodes méta-heuristiques (recuit simulé ou algorithme génétique).
- Des agents plus ou moins sophistiqués (*AP_MAS*) utilisant des méthodes approchées plus sophistiquées.
- Des agents utilisant des outils performants tel que Cplex, (*AP_MP*) pour la résolution des modèles d'optimisation linéaire proposé au Chapitre II.

Enfin, pour assurer les communications avec son agent négociateur chaque agent planificateur (AP) possède des moyens de réception, traitement et envoi de messages.

3.2 Agent Négociateur du NEV (AN)

De la même manière, les agents négociateurs des NEV ont les mêmes moyens de réception et de transmission de messages. On leur associe aussi un niveau d'intelligence qui diffère pour chaque agent négociateur. On distingue trois types:

- *Agent négociateur simple* : c'est un agent qui n'est doué d'aucune initiative et qui répond à chaque sollicitation par "je ne peux pas" ou "je peux", éventuellement en indiquant avec quel coût.
- *Agent négociateur de 2^{ème} classe* : il cherche à satisfaire au mieux ses correspondants et peut donner les meilleures solutions trouvées selon différents critères.
- *Agent négociateur de 1^{ère} classe* : c'est un agent qui cherche aussi à satisfaire au mieux ses correspondants et en cas d'échec, il est capable de faire des contre-propositions.

3.3 Agent Négociateur de Niveau et Agent Médiateur

Compte tenu du rôle des Agents Négociateurs de Niveau (NAL), deux grandes propriétés les distinguent :

- **Propriété liée au niveau d'intelligence** : elle caractérise l'ensemble des outils d'aide à la décision utilisés par le NAL en cas de conflit. On cite deux cas de figures :
 - Les NAL qui utilisent des règles simples de répartition des composants, des produits et des « cas problématiques » entre les NEV du niveau et éventuellement qui peuvent proposer une succession de 'choix simples' afin de négocier une solution planifiée du niveau réalisable.

- Les **NAL** qui possèdent en plus l'aptitude de fusionner les différentes solutions planifiées proposées par les **NEV**. Ils peuvent aussi choisir une meilleure fusion garantissant un coût optimal pour le niveau qui minimise les pénalités vis-à-vis des clients et/ou des fournisseurs.

➤ **Propriété liée à la difficulté du niveau de négociation** : celle-ci caractérise la complexité des nomenclatures des produits fabriqués sur le niveau considéré. La difficulté de la négociation change en fonction du type des produits manipulés sur le niveau (mono-produit mono-composant, mono-produit multi-composants ou multi-produits multi-composants).

Pour un Agent Médiateur (MA), nous supposons qu'il possède la possibilité de fusionner les bons plannings et assurer l'objectif global de l'EV.

4 Les flux échangés au sein de l'EV

Dans une relation marchande, les activités d'achat et de vente peuvent être divisées en trois phases principales [Gebauer et Segev 99] :

- ⇒ Phase d'information : où les clients identifient leurs besoins, choisissent leurs fournisseurs et rassemblent des informations concernant les produits et les services proposés.
- ⇒ Phase de négociation : son objectif est d'atteindre un accord par la détermination des prix, des produits disponibles, des dates de livraisons et des contraintes de capacité.
- ⇒ Phase de règlement : dans laquelle, la commande est acceptée. Par conséquent les flux de produits et d'argent sont échangés en sens opposé entre les différentes entreprises.

Dés lors, au sein d'une entreprise virtuelle, les principaux flux étudiés dans notre modèle, sont les suivants :

- Les flux d'information et de communication qui constituent le support des données circulant dans l'entreprise virtuelle ;
- Les flux de matières qui constituent les échanges physiques entre installations de l'EV. Ils regroupent les flux de produits et les flux monétaires.

4.1 Les flux d'information

Les flux d'information forment le support à toutes les actions de coordination et négociation. Ils permettent aux partenaires d'échanger les différentes données qui leurs sont communes afin

d'améliorer la productivité de l'EV. Cependant, l'information en temps réel est rarement employée pour modifier les plannings déjà établis ; elle est généralement utilisée juste de façon "ad hoc" pour corriger localement les problèmes à court terme [Cowling et Johansson 02].

Pour tenir compte des aléas en temps réel sur les plannings, nous supposons que différentes données sont partagées entre les agents de l'entreprise virtuelle. Néanmoins, dans cette thèse, on s'intéresse surtout aux données qui seront la base des communications entre NEV sans porter d'attention particulière aux données statiques (données liées aux systèmes de production, aux ressources, aux commandes...), données bien maîtrisées depuis longtemps dans les systèmes d'information de l'entreprise.

Nous distinguons parmi l'ensemble des données échangées au sein de l'EV :

- Les données Contractuelles qui sont définies à partir des contrats établis sur une durée plus ou moins longue entre l'EV et ses partenaires extérieurs d'une part, et entre NEV (ou partenaires internes de l'EV) d'autre part. Ces données sont en général stockées dans une base de données accessible à tous les partenaires de l'EV et doivent contenir les informations suivantes :

- La validité du contrat
- La date d'établissement du contrat
- Les produits concernés tout en spécifiant les quantités minimales et maximales à livrer pour chaque période, les fourchettes acceptables, les pénalités de retard et éventuellement des bonus d'avance...

- Les données de type Courbes Cumulées soit d'Approvisionnement (A), soit de Livraison (L), soit Calculée (V) ou Imposée (D). Ces données sont stockées dans une base de données commune à chaque niveau et sont d'une durée bien déterminée. Chaque courbe cumulée élémentaire doit spécifier les informations suivantes :

- L'émetteur
- Le destinataire
- Un identifiant de la courbe
- Un pointeur sur le produit concerné
- Un tableau d'entiers positifs avec la propriété : $CC(i+1) \geq CC(i)$
- Nature de la courbe repérée par un code prenant les valeurs suivantes : « AD », « AV », « LD », « LV ».

On note que les courbes cumulées globales sont un ensemble de courbes cumulées élémentaires.

4.2 Les flux de matières

Les flux de matière regroupent les différents produits et composants qui traversent l'EV et les paiements ou les différents arrangements entre partenaires qui les accompagnent (mensualités de paiements, avances, crédit...). Ce flux doit spécifier

- L'émetteur
- Le destinataire
- Les produits concernés en spécifiant les quantités et la date d'obtention. Cette dernière sert à évaluer la faisabilité d'une commande [Monteiro 01].

5 La négociation au sein de l'EV

Dans l'architecture proposée de l'EV, le modèle de planification global est basé entre autres sur la négociation entre tous les partenaires. Afin de simplifier les modèles de la négociation, celle-ci est classée selon trois types :

- La *négociation inter niveaux*, elle concerne la négociation entre les agents négociateurs des différents niveaux,
- La *négociation intra niveau*, elle concerne la négociation entre les ANs des NEV avec l'Agent Négociateur de Niveau,
- La *négociation au sein du NEV* entre l'Agent Planificateur (AP) et l'Agent Négociateur (AN).

Du fait de la définition duale de chaque niveau (fournisseur du niveau amont adjacent et donneur d'ordres du niveau aval adjacent), nous distinguons pour chaque niveau, et par la suite pour chaque NEV, deux types de négociation, à savoir la négociation aval et la négociation amont.

Avec le premier type, chaque NAL entre en négociation avec le niveau client suite à une nouvelle commande ou une modification des commandes déjà passées. Tandis que la négociation amont est mise en jeu lorsqu'un NAL cherche à valider certaines décisions auprès du niveau fournisseur. Le mode de négociation de chaque NEV est similaire à celui du NAL du niveau auquel il appartient.

Pour une étude complète des différentes négociations au sein de l'EV, nous devons expliciter d'une part le processus et les suivis de chaque négociation le long de l'EV (entre les différents niveaux de l'EV) et d'autre part entre les différents NEV et leur NAL mais, du moment que nous ne

pouvons pas limiter le nombre de niveaux ainsi que le nombre de NEV, nous allons nous contenter de décrire les négociations pour un niveau et pour un NEV.

En effet, cette proposition se justifie très bien grâce à : la grande récurrence existant dans le système, de plus ce qui peut être dit pour un niveau ou un NEV reste valable pour un autre et enfin du fait que le modèle de planification que nous avons proposé se fait par niveau.

5.1 Hypothèses sur les processus de négociation

Pour la modélisation des différentes négociations, nous avons fait un ensemble d'hypothèses réglementant le fonctionnement des différents agents :

- L'ensemble des négociations est passé par le MA qui reste superviseur de toute la chaîne et établit l'historique de chaque négociation.
- Chaque NAL cherchera à satisfaire au maximum les NEV de son niveau sans pénaliser à chaque reprise le même NEV.
- En adoptant une approche simple basée sur les capacités des NEV en terme d'heures normales et heures supplémentaires (sans intervention de sous-traitance) et sur les prévisions de chaque NEV, le NAL répartit les demandes et les composants d'une façon équitable sur les NEV.
- Durant chaque négociation, le NAL ne doit pas rediscuter avec les niveaux amont ou aval des décisions prises avant.
- Dans le cas de dépassement de ce qui est convenu dans les contrats, le NAL peut demander des compensations financières au profit des NEV ayant utilisés des surcapacités ; et de même, les NEV de son niveau seront responsables des surcoûts qu'ils auraient engendrés pour le niveau fournisseur.
- Chaque NEV a la totale autonomie d'utiliser ses capacités et le choix de sa stratégie de gestion, mais en même temps sera responsable de garantir le bénéfice de son niveau sur un horizon donné.
- Lorsque l'on fournit aux NALs ou aux ANs des CCAD et des CCLD, on suppose toujours qu'à la période 1 les niveaux de stock sont égaux aux niveaux de stock réels constatés à l'instant 0.
- On suppose que pendant toute la construction d'un planning, les prix d'achat et les prix de vente des composants entre les NEV ou avec l'extérieur des NEV sont fixes et donc contenus dans la base de données de l'EV. Il n'est donc pas nécessaire de les introduire

dans les messages. Il en est de même des coûts de sous-traitance et autres données permettant de calculer les coûts de production.

5.2 La négociation inter niveaux

La communication est la base de toute négociation. Nous avons adopté la communication par envoi de messages au sein de l'EV.

Le NAL du niveau étudié échange des messages avec les NAL adjacents. Parmi ceux-ci, les principaux messages sont :

- Proposition de solutions planifiées de niveau
- Mission de planification de niveau
- Réponse aux propositions de solutions planifiées de niveau
- Réponse aux missions de planification de niveau

5.2.1 Proposition de solutions planifiées de niveau

Il s'agit de messages contenant des solutions planifiées de niveau et qui sont échangées entre le niveau étudié et un niveau adjacent lors des négociations. Un message de ce type sera exprimé sous la forme d'un tableau comme indiqué ci-dessous:

PROP_SOL_PL_NIV

% proposition envoyée par un NAL adjacent au NAL du niveau k étudié pour lui proposer les solutions planifiées acceptables de niveau.

Emetteur : un NAL via le MA

Récepteur : le NAL k

Un numéro de proposition.

Un indicateur de mode de construction de planning.

Une liste de sous-propositions de solutions planifiées à construire :

Un ensemble de NIV_CCAD pour les composants ou (NIV_CCLD pour les produits) en fonction de la valeur de l'indicateur de mode.

Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalité de retards.

Le numéro de la proposition permet de comptabiliser le nombre de propositions échangées entre les deux niveaux. Dans le cas d'un grand nombre de va et vient, le médiateur intervient pour arrêter le processus de négociation.

L'indicateur de mode de construction de planning indique au NAL le mode de planification à adopter (direct, rétrograde). Il indique en quelque sorte le niveau avec lequel le NAL négocie;

Enfin, pour la liste de sous-propositions : Si l'indicateur de mode de construction de planning est **direct**, ce qui veut dire que le NAL négocie avec le niveau amont, alors le message contiendra un ensemble de NIV_CCAD. Par contre, si l'indicateur de mode de construction de planning est **rétrograde**, ce qui veut dire que le NAL négocie avec le niveau aval, alors le message contiendra un ensemble de NIV_CCLD.

5.2.2 Mission de planification de niveau

Ce type de message est envoyé par l'agent médiateur au NAL k quand le MA prend en charge le processus de planification globale de l'EV. Le message contiendra des scénarios amont ou aval que proposent le MA au NAL tout en demandant de chercher les solutions possibles avec les meilleurs coûts. Le message sera exprimé sous la forme d'un tableau comme indiqué ci-dessous :

MISS_PL_NIV

% mission de planification envoyée par le MA au NAL du niveau k étudié pour lui demander de chercher des solutions planifiées de niveau sous les contraintes de scénario envoyé et les contraintes amont ou aval.

Emetteur : le MA

Récepteur : le NAL k

Un indicateur de type de scénario.

Un numéro indiquant le rang où a commencé la construction de scénarios

Une liste de scénarios indiquant :

Un ensemble de NIV_CCAD pour les composants ou (NIV_CCLD pour les produits) en fonction de la valeur de l'indicateur de mode.

Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalité de retards.

Le coût de scénarios

Une éventuelle promesse de compensation financière accordée à chaque scénario.

L'indicateur de type de scénario peut être amont ou aval. Il permet de préciser le mode de planification établie : direct ou rétrograde;

Le numéro indiquant le rang où a commencé la construction de scénario permet au NAL de savoir à partir de quel rang on a commencé la macro-itération. :

Si le rang envoyé est RR et si le type de scénario est amont, cela veut dire que :

- la construction initiale de planning qui était rétrograde a échoué, et qu'on est passé en planification en mode direct,
- la planification rétrograde a échoué au rang RR, là où on a commencé à planifier en direct.

Si le rang envoyé est RR et si le type de scénario est aval, cela veut dire que :

- la planification est en mode rétrograde,
- la précédente planification rétrograde a échoué au rang RR, (là où on a commencé à planifier en direct) et quand les scénarios amont depuis le rang RR jusqu'au rang 1 sont cohérents, on a recommencé à planifier en rétrograde depuis le rang RR.

Enfin, la liste de scénarios spécifie les courbes cumulées d'approvisionnement ou les courbes cumulées de livraison, le coût de scénario et d'éventuelles compensations financières.

Un autre cas peut se poser, c'est le cas où le médiateur demande au NAL k de planifier en mode contraint. Dans ce cas, le numéro indiquant le rang où a commencé la construction de scénarios sera k , le type de scénario sera *contraint* et enfin le MA spécifiera les CCAD et les CCLD à respecter absolument; avec un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalité de retards.

5.2.3 Réponse aux propositions de solutions planifiées de niveau

Il s'agit de réponses de solutions planifiées de niveau que le NAL du niveau k envoie comme réponses aux messages de type PROP_SOL_PL. La réponse sera sous la forme suivante :

REP_PROP_SOL_PL_NIV

%Réponse aux propositions envoyées par un NAL adjacent au NAL du niveau k étudié.

Emetteur : le NAL k

Récepteur : un NAL via le MA

Un numéro de proposition.

Un indicateur de mode de construction de planning.

Une liste de sous-propositions de solutions planifiées à construire :

Un ensemble de NIV_CCAV pour les composants ou (NIV_CCLD pour les produits) en fonction de la valeur de l'indicateur de mode.

Le coût global de chaque NIV_CC(A ou L)V

5.2.4 Réponse aux missions de planification de niveau

Ce type de message est envoyé par le NAL au MA comme réponse au message de type mission de planification. Si un ou plusieurs parmi les scénarios envoyés est faisable, alors le NAL envoie un scénario complétant les scénarios envoyés tout en ajoutant le coût de la solution qu'il propose. Le message sera donné sous la forme suivante :

REP_MISS_PL_NIV

%Réponse au message mission de planification de niveau.

Emetteur : le NAL k

Récepteur : un NAL via le MA

Un indicateur de type de scénario.

Un indicateur de réussite si mode = "contraint".

Une liste de scénarios indiquant :

Un ensemble de NIV_CCAV pour les composants

Un ensemble de NIV_CCLV pour les produits

Le coût global de chaque scénario

On note que pour les réponses, les courbes cumulées sont calculées par le niveau.

Si le niveau n'arrive pas à construire un scénario faisable et si le mode = "contraint", alors il envoie un message "échec de planification".

5.3 La négociation intra-niveau

De même au sein d'un même niveau, nous adoptons la négociation via une communication par envoi de messages. Le choix de la communication par utilisation d'un tableau noir (black-board) pour le niveau peut être envisageable [Teruaki et Salleh 00] mais nous avons préféré laisser une certaine discrétion entre le NAL et chaque NEV.

Les principaux messages échangés entre le NAL et les NEV sont :

- Missions de planification
- Réponses aux missions de planification

5.3.1 Mission de planification de NEV

Il s'agit d'un message de type mission envoyé à un AN par son NAL pour lui demander de construire plusieurs plannings correspondant à différentes répartitions des composants et/ou des produits selon des choix de courbes cumulées amont et aval et qui lui demande pour chaque jeu de courbes un nombre donné maximal de plannings différents. Une mission est complètement de type rétrograde ou directe ou contrainte.

L'AN examine la mission et il la transforme en appels successifs à son AP. A chaque réponse de l'AP, il évalue les solutions par rapport à la demande du NAL et constitue une base de données locale de réponses.

Le format du message sera donné sous la forme :

MIS_CONST_LIST_PL_NEV

Emetteur : un NAL

Récepteur : un AN

Un numéro de mission.

Un indicateur de mode de construction de planning.

Une liste de sous-missions de solutions planifiées à construire :

Un ensemble de CCAD pour les composants.

Un ensemble de CCLD pour les produits à fabriquer.

Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalités de retard.

Une éventuelle promesse de compensation financière.

Dans le cas de ce message, le NAL transmet à chaque AN de son niveau (les nœuds, bien sûr concernés par les produits demandés) les CCAD et les CCLD, avec en plus, pour chaque couple (CCAD, CCLD), un éventuel ensemble de pénalités (retard ou avance) ou des promesses financières.

5.3.2 Réponse aux missions de planification de NEV

Pour répondre aux messages de type *mission de planification de NEV*, chaque AN envoie un message de type *réponse à la demande de mission de planification de NEV*. Le message sera sous la forme d'un ensemble de solutions planifiées de NEV. Le format du message est sous la forme suivante :

REP_MIS_CONST_LIST_PL_NEV

% réponse d'un AN à une mission lui ayant demandé de construire des solutions planifiées %

Emetteur : un AN

Récepteur : le NAL

Le numéro de mission.

Un ensemble de solutions panifiées de NEV =

Un ensemble de CCAV pour les composants.

Un ensemble de CCLV pour les produits à fabriquer.

Le coût de la solution

La liste de pénalités d'avance et/ou de retard par période et par produit.

Un indicateur de réussite si mode = "contraint".

Si le NEV n'arrive pas à construire un scénario faisable et si le mode est "contraint", alors il envoie un message "échec de planification".

5.4 La négociation au sein du NEV

Du même, nous définissons le système de communication et de négociation au sein de chaque NEV sous forme d'un ensemble de messages échangés.

5.4.1 Mission de construction d'un nouveau planning

C'est un message envoyé par l'AN à l'AP pour lui demander de construire une nouvelle solution complète sans se baser sur le planning prévu. Le format du message sera sous la forme suivante :

MIS_CONST_PL_TOT

Emetteur : un AN
Récepteur : un AP

Un numéro de mission.
Un indicateur de mode de construction de planning.
Un ensemble de CCAD pour les composants.
Un ensemble de CCLD pour les produits à fabriquer.
Un ensemble de limites de capacité pour les ressources.
Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalités de retard.

5.4.2 Mission de construction partielle d'un planning pour certains produits

C'est un message envoyé par l'AN à son AP lui demandant de construire une nouvelle solution planifiée complète en se basant sur un planning préalable et en corrigeant seulement certains produits. Le format du message sera sous la forme suivante :

MIS_CONST_PL_PART_PROD

Emetteur : un AN
Récepteur : un AP

Un indicateur de mode de construction de planning.
Un ensemble de CCAD pour les composants.
Un ensemble de CCLD pour les produits à fabriquer.
Un ensemble de limites de capacité pour les ressources.
Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalités de retard.

Une liste de produits à retravailler.

L'ancien planning =
Un ensemble de CCAV pour les composants.
Un ensemble de CCLV pour les produits à fabriquer.
Une matrice des quantités produites pour tout produit et toute période.
Une matrice des quantités sous-traitées pour tout produit et toute période.

5.4.3 Mission de construction partielle d'un planning pour certaines périodes

C'est un message envoyé par l'AN à un AP lui demandant de construire une nouvelle solution planifiée complète en se basant sur un planning préalable et en corrigeant seulement un sous-ensemble contigu de périodes. Le format de message sera sous la forme suivante :

MIS_CONST_PL_PART_PERIODE

Emetteur : un AN

Récepteur : un AP

Un indicateur de mode de construction de planning.

Un ensemble de CCAD pour les composants.

Un ensemble de CCLD pour les produits à fabriquer.

Un ensemble de limites de capacité pour les ressources.

Un ensemble facultatif de pénalités d'avance et/ou de pénalités de retard.

L'intervalle de temps à retravailler.

L'ancien planning =

Un ensemble de CCAV pour les composants.

Un ensemble de CCLV pour les produits à fabriquer.

Une matrice des quantités produites pour tout produit et toute période.

Une matrice des quantités sous-traitées pour tout produit et toute période.

5.4.4 Réponse à une mission de construction d'un planning

Le message constitue une réponse d'un AP à une mission lui ayant demandé de construire une nouvelle solution planifiée. Ce type de message sera de la forme :

REP_MIS_CONST_PL

Emetteur : un AP

Récepteur : un AN

Un numéro de mission.

Un nouveau planning =

Un ensemble de CCAV pour les composants.

Un ensemble de CCLV pour les produits à fabriquer.

Une matrice des quantités produites pour tout produit et toute période.

Une matrice des quantités sous-traitées pour tout produit et toute période.

Un indicateur de réussite si mode = "contraint".

Une liste de coûts de production par période et par ressource (heures supplémentaires, heures inemployées)

Une liste de coûts de production par période et par produit (sous-traitance...)

Une liste de pénalités d'avance et/ou de retard par période et par produit.

6 Modélisation par les Statecharts des différents agents

6.1 Introduction

Pour mieux visualiser les comportements des différents agents et ainsi les processus de négociation au sein de l'EV, nous allons utiliser les diagrammes de Harel [Harel 86] connu sous le nom de statecharts.

Les statecharts de Harel sont des diagrammes d'état utilisés pour modéliser les différents stades que peuvent prendre un système complexe réactif soumis à des événements extérieurs et intérieurs, ainsi qu'à des contraintes liées au temps [Harel 86], [Sahraoui 91]. Ils sont représentés par des graphes dans lesquels les rectangles arrondis correspondent à des états du système et les arcs à des transitions entre états représentant des actions du système. Ils correspondent à une amélioration des machines à états, basée sur la hiérarchisation du modèle et sur la synchronisation d'états évoluant en parallèle [Roy 99].

Afin d'alléger les figures qui vont suivre, nous avons utilisé des abréviations pour ce qui est des transitions entre états des agents (Tableau III.1).

Abréviation	Signification
F_plan	Fin planification
SA	Rapport si des solutions sont acceptables
FM	Rapport sur la fin de spécification de modalités
F_Rep	Rapport de fin de répartition
RC	Réponses complètes des NEVs
F_Reg	Rapport de fin regroupement
F_E	Fin étude
S_A	Solutions acceptables
F_MAJ	Fin mise à jour de la base de données des réponses
F_envoi	Fin envoi

Tableau III.1 : Abréviations utilisées dans les Statecharts

On note que nous avons utilisé une barre oblique (slash : /) pour marquer la négation. Nous nous sommes servis également de signe positif "+" correspondant au "OU logique".

6.2 Statechart de l'Agent Planificateur

L'Agent Planificateur, comme nous l'avons défini, est un agent qui exécute les requêtes demandées par l'Agent Négociateur sans avoir aucune initiative. Il n'a pas pour objectif de suivre la production ou le déroulement du planning. Son seul rôle est de construire des plannings dans l'environnement qu'on lui impose.

En résumé, il reçoit de l'AN des directives et il renvoie le résultat correspondant. Il s'agit d'une seule et unique procédure qui s'active et qui à partir des paramètres du message renvoie un planning calculé (Figure III-4).

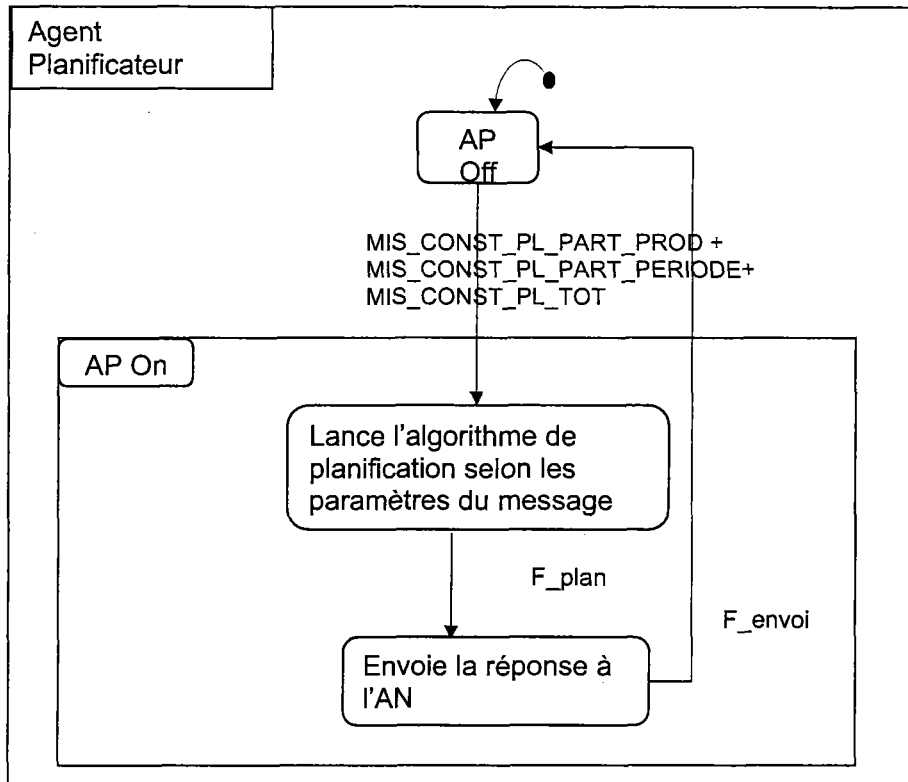


Figure III-4 : Statechart de l'Agent Planificateur

6.3 Statechart de l'Agent Négociateur

On suppose que l'AN n'accepte qu'une seule mission globale à la fois de son NAL, celle-ci ne pouvant être interrompue pour passer à une autre mission. Dans le cas d'un message prioritaire d'annulation, l'AN arrête toutes les procédures qu'il a déjà commencées et se remet en état inactif. Dans notre représentation (Figure III-5), nous n'avons pas présenté le cas d'un message d'annulation juste pour ne pas alourdir le statechart, sinon on aurait deux macro-états qui s'exécutent en parallèle comme nous l'avons détaillé dans [Ouzizi *et al.* 03]:

Le premier macro-état sert pour la réception des messages et le deuxième pour les traitements que nous représentons sur la Figure III-5. En cas d'un message d'annulation au niveau du premier macro-état, le traitement se résume à la remise en état inactif de l'AN.

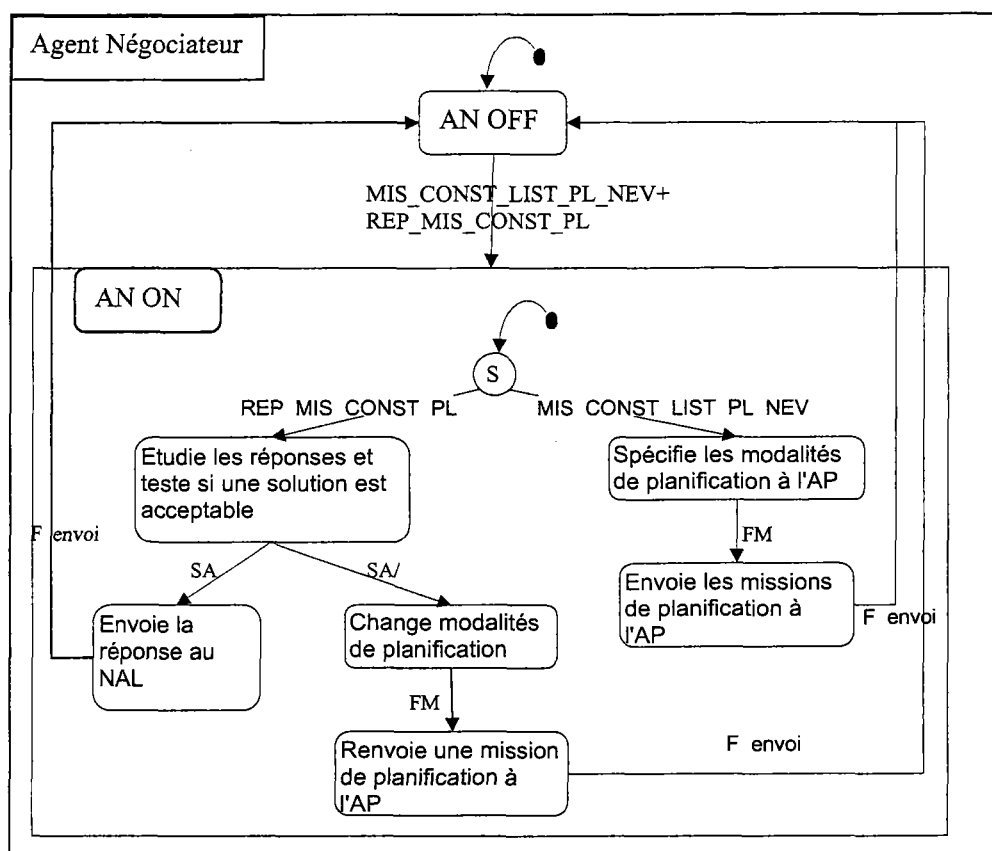


Figure III-5 : Statechart de l'Agent Négociateur

Comme nous l'avons indiqué au niveau de la définition des messages, l'AN ne reçoit des messages que de son AP ou de son NAL. Il les traite selon une liste d'arrivées.

S'il s'agit d'une mission de planification venant du NAL, l'AN spécifie les modalités de planification à son AP et lui envoie une succession de missions et se remet en état inactif en attente des réponses. On suppose que le NAL n'envoie une mission qu'après réception d'une réponse préalable (sauf dans le cas d'une annulation dont nous avons déjà parlé).

S'il s'agit d'une réponse venant de l'AP, l'AN l'étudie et vérifie sa faisabilité. Si la solution est faisable, il l'envoie au NAL. Sinon, il change des modalités de planification (nombres d'heures supplémentaires acceptables, quantités maximales à sous-traiter...) et renvoie une nouvelle mission de planification à l'AP et se remet en état inactif en attendant des réponses.

6.4 Statechart de l'Agent Négociateur de niveau

Les différents états du NAL durant son processus de négociation sont schématisés dans la figure III-6. Le NAL n'est pas actif en permanence, seule l'arrivée d'un message soit du MA (un NAL adjacent via le MA), soit des AN l'active. Comme pour les AN, le NAL traite message par message en fonction de l'ordre d'arrivée et n'accepte pas de nouvelles missions de planification tant qu'il n'a pas répondu à une mission préalable.

Dans le cas des messages venant de l'Agent Médiateur (PROP_SOL_PL_NIV ou MISS_PL_NIV), le NAL répartit les courbes cumulées d'approvisionnement et/ou de livraison du niveau sur les NEV concernés, leur envoie des CCAD ou des CCLD et après se remet en état inactif. Dans le cas des messages de réponses des AN (REP_MIS_CONST_LIST_PL_NEV), le NAL constitue une base de données des réponses et vérifie s'il a reçu toutes les réponses des AN.

Dans le cas où il a reçu toutes les réponses, il regroupe les solutions des NEV et constitue des solutions planifiées de niveau. Si les solutions constituées sont acceptables, il les envoie au MA. Sinon, il change les paramètres de planification, envoie d'autres CCAD et CCLD aux NEV et se remet en état inactif.

Tandis que si le NAL n'a pas reçu toutes les réponses, il consulte les AN n'ayant pas répondu et attend leur réponse. Il sort de son attente dès qu'il reçoit un message REP_MIS_CONST_LIST_PL_NEV. Il met à jour la base de données des réponses et refait le test s'il a reçu toutes les réponses.

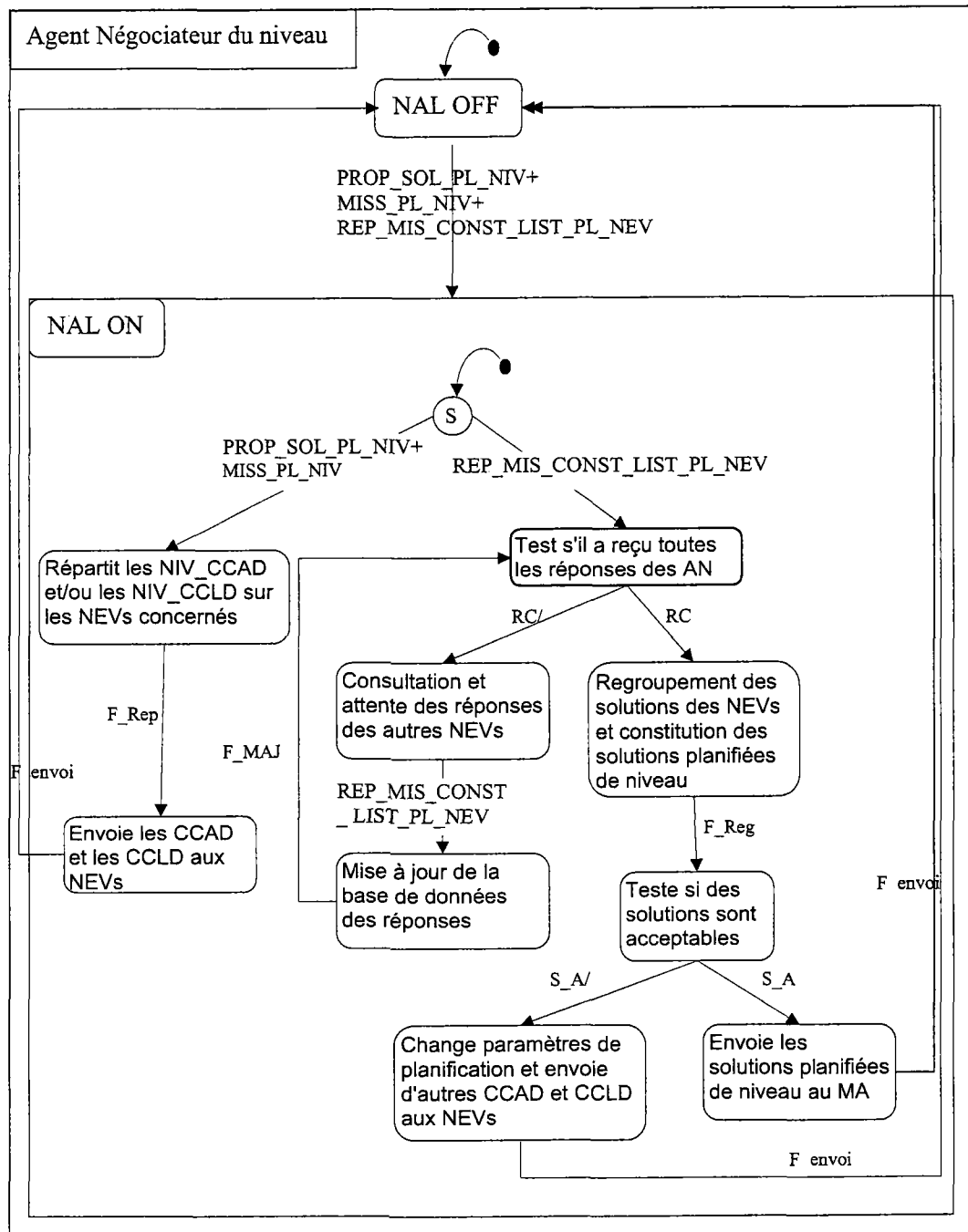


Figure III-6 : Statechart de l'Agent Négociateur de Niveau

7 La médiation au sein de l'EV

7.1 Introduction

L'utilisation de la médiation pour la coordination au sein d'une EV n'est pas nouvelle. En effet, [Beck 94] a relevé plusieurs raisons pour l'adoption de la médiation au niveau des chaînes logistiques. Plus spécifiquement, il indique que :

- La médiation minimise les connaissances pour la coordination requise pour chaque agent.
- La coordination au sein des chaînes logistiques est nécessaire quand le planning de toute la chaîne n'est pas faisable.
- Les problèmes de planification et de synchronisation au sein des chaînes logistiques peuvent se limiter à la planification de quelques ressources rares [Smith 89] [Fox 90] [Sadeh 91].

[Sathi 89] indique que de tels problèmes avec des éléments clés peuvent être mieux résolus par la médiation.

En plus de notre approche utilisant la négociation comme moyen de diversification du champ des solutions pour chaque niveau (et par suite pour chaque NEV), nous profitons aussi des avantages d'une coordination par médiation assurant la convergence de toute négociation, ce qui constitue le rôle de l'agent médiateur.

7.2 Les principaux états du MA

D'après les fonctionnalités du MA que nous avons détaillées auparavant, nous récapitulons les principaux états de l'agent médiateur sont :

- **Etat initial**, quand il n'a pas encore travaillé ; pour identifier cet état on pose $MAXrang = 0$,
- **Etat de départ**, quand il a déjà réussi à établir un planning global mais souhaite relancer une recherche de plannings négociés cohérents pour cause de retards finaux trop élevés (va recommencer en changeant les pénalités),. On suppose qu'il est capable de visiter une liste de solution globale planifiée déjà construite de manière à travailler à son changement de pénalité). Dans ce cas aussi, $MAXrang = 0$ et réussite = OK.
- **Il est en attente** d'un travail qu'il a demandé à un NAL, dans ce cas, il sait exactement par des repères où il en est. Dans ce cas, soit il :
 - Attend du NAL k , un planning rétrograde (ayant entraîné éventuellement une négociation avec le NAL $k-1$),

- Attend du NAL k , un planning direct
- **Il a reçu une réponse du NAL k et il en déduit**
 - Qu'il peut passer à NAL $k+1$ en rétrograde, dans ce cas $MAXrang=MAXrang+1$
 - Il a échoué en rétrograde au rang k , il doit basculer en direct pour le rang k , $MAXrang = k$
 - Il vient de terminer un planning direct au rang k , il doit passer à NAL $k-1$ en direct
 - Si $k=N$: il a un planning complet dont il est satisfait (implique arrêt)
 - Si $k=N$: il a un planning complet dont il est moyennement satisfait (au sujet des coûts), il retourne à l'état de départ avec changement de pénalités si son compteur de nombre d'essais maximaux ($MAXessaisglobaux$) n'est pas nul. On note que le nombre d'essai est décrémenté à chaque remontée ou descente de planning.
 - $k=1$: si $MAXrang=N$ et il a un planning complet dont il est satisfait (implique arrêt)
 - $k=1$: si $MAXrang=N$ et il a un planning complet dont il n'est pas complètement satisfait et $MAXessaisglobaux$ n'est pas nul, changement de pénalités et retour à départ
 - $k=1$: $MAXrang < N$, alors on continue en rétrograde avec NAL $k+1$

Du fait que le MA doit consulter à chaque fois un NAL de rang différent (en fonction de l'état où il se trouve), il nous a été difficile de représenter ses différents états dans un Statechart. Si nous voulons le faire, il faut spécifier au départ le nombre de niveaux et faire le Statechart du MA correspondant.

8 Conclusion

Lors de ce chapitre, nous avons présenté une formalisation et une description de l'architecture informatique représentant notre approche de l'EV.

Les systèmes multi-agents ont permis tout à la fois de représenter la structure de l'EV et sa dynamique tout en se dotant d'outils d'aide à la décision. Dans notre étude de l'architecture informatique de l'entreprise virtuelle, notre objectif n'était pas de mettre en place une plate forme d'agents communiquant, par contre notre objectif est de modéliser les différents comportements des agents ainsi que la structure des différents messages échangés.

Une définition détaillée des fonctionnalités des différents agents, pouvant représenter plusieurs types de système de production et de gestion, est présentée ainsi que les différentes négociations entamés en fonction des modes de planification demandés et des éventuelles perturbations pouvant survenir au niveau des plannings.

La modélisation par les Statecharts montre que les agents changent d'états soit à la réception d'un ou plusieurs messages soit suite à un traitement qu'il effectue. Ce qui montre bien que ce sont des modules événementiels.

CONCLUSIONS
&
PERSPECTIVES

Conclusions

Dans cette thèse, nous avons proposé un ensemble d'outils d'aide à la décision pour la construction d'un ensemble cohérent de plannings prévisionnels au sein d'une entreprise virtuelle, dans le cadre de l'utilisation d'une technique de plan glissant. Entre une approche totalement centralisée où l'ensemble de tous les plannings est construit par un organe central et une approche totalement distribuée où chaque entité de l'entreprise virtuelle détermine son propre planning, nous avons retenu une approche semi centralisée. Notre approche est centralisée dans la mesure où un médiateur pilote la recherche globale de l'ensemble des plannings cohérents en utilisant une stratégie itérative et convergente. Notre approche est décentralisée dans la mesure où les plannings de chaque niveau sont négociés entre les entités du même niveau et en interaction avec les niveaux immédiatement adjacents.

Pour atteindre cet objectif, nous avons été amené à définir des modèles de données. Les modèles essentiels pour la base des négociations sont les courbes cumulées d'approvisionnement et de livraison, qui peuvent être souhaitées, imposées ou calculées. D'autres modèles de données sont associés à des choix sur l'environnement de production, sur des contrats entre les NEVs et sur la manière de calculer et de répartir des coûts réels ou virtuels entre les différentes entités.

Dans le cadre de l'approche décentralisée, un certain nombre de décisions doivent être prises. Pour concevoir des outils aidant à cette prise de décision, un certain nombre de problèmes ont été définis. Pour chacun d'eux, nous avons délimité son environnement et nous l'avons exprimé en terme de contraintes et d'objectifs, modélisés pour une partie d'entre eux par des modèles de programmation linéaire en nombres entiers. Par ailleurs, nous avons proposé des procédures de résolution allant de propositions très empiriques et simples à des méthodes plus sophistiquées utilisant, entre autres, des algorithmes génétiques.

Nous avons prévu l'enchaînement de ces procédures plus ou moins évoluées afin d'arriver sûrement à un ensemble de plannings cohérents que l'on espère de bonne qualité par rapport à une optimisation globale des plannings de l'entreprise virtuelle.

Nous n'avons pas implanté à proprement parler notre proposition mais nous avons vérifié les programmes de planification et cherché à décrire de la manière la plus complète possible tous les modèles de données et toutes les procédures de calcul intervenant dans cette architecture de recherche de plannings cohérents. En outre, sous l'hypothèse que ces plannings peuvent être

construits au moyen d'une approche multi-agents, nous avons décrit le plus complètement possible le système multi-agents correspondant. Il est convenu que certains de ces agents pourront utiliser les procédures prévues ou agir en mode interactif avec des décideurs humains. Notre description inclut, outre les modèles de données déjà définis, l'ensemble des messages que s'échangent les agents ainsi que leur comportements en fonction de différents modes d'activation.

Le résultat de ce travail est donc, lorsque les agents ont fini leur négociation, un ensemble de plannings cohérents dont seule la première période est utilisée par les entreprises à des fins de production. Une période du moyen terme plus tard, le système multi-agents est à nouveau activé pour tenir compte des écarts entre ce qui vient d'être produit et ce qui aurait dû être produit ainsi que des variations dans les demandes des clients externes (commandes fermes) et dans les prévisions pour les périodes futures. En particulier, on doit ajouter une période à la fin de l'horizon de planification.

Il est à noter que la recherche de plannings cohérents proposés peut également être appliquée au sein d'une entreprise dont les secteurs de production joueraient le rôle de NEVs. Cela donnerait une méthode itérative et semi décentralisée lui permettant de construire ses plannings de moyen terme.

A la différence de plusieurs autres travaux qui utilisaient soit des agents libres et pouvant négocier jusqu'à l'obtention d'un résultat qu'on suppose toujours possible ou la médiation se basant plutôt sur des relaxations des contraintes de certains pour l'atteinte d'un objectif global, nous avons adopté les deux outils.

En effet, notre système multi-agents, au départ, utilise la négociation entre niveaux et au sein du même niveau afin que chaque partie atteigne ses objectifs mais dans le cas de non convergence du système, une relaxation de contraintes de certaines parties (qui leur semblent les moins coûteuses) s'avère nécessaire pour pouvoir accomplir une planification globale d'un ensemble hétérogène de décisions et de décideurs.

Perspectives

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pris en compte des aléas qui peuvent apparaître au cours de la première période tels que des pannes longues d'une ressource, incidents importants retardant des arrivées en composants connus pour la période suivante, écarts non négligeables entre la prévision des demandes externes de la première période et les demandes réelles... Notre technique de plan glissant ne prend pas en compte ces aléas au fur et à mesure de leur apparition. Si les outils de suivi de réalisation de la production sont capables de détecter qu'il est important de réorganiser l'ensemble de plannings cohérents avant la fin de la première période. Il est facile de corriger notre architecture de recherche de plannings cohérents en considérant que la première période est limitée au temps restant à effectuer et sans avoir besoin de rajouter une période en fin d'horizon. Dans ce cas, les solutions de planning existantes seraient probablement une meilleure base de départ avant la prise en compte des aléas.

Il faut noter que dans toute la présentation de ce travail, nous avons considéré que les entités de l'EV étaient des entités de production. En conséquence, nous avons associé à chaque NEV un agent planificateur de production. Par ailleurs, nous avons utilisé l'hypothèse simplificatrice qui consistait à supposer que tout produit fabriqué pendant une période à un niveau donné était disponible à la période suivante pour le niveau adjacent qui l'utilise. Nous pouvons prendre en compte des transports plus compliqués entre deux niveaux. Pour cela, il faut ajouter un niveau d'entités assurant les transports et supposer éventuellement qu'il faudra un décalage de temps de plusieurs périodes si certains transports le nécessitent. Les problèmes à résoudre de ce nouveau niveau ne seront plus des problèmes de planification mais des problèmes de transport.

Nous avons imaginé que, lorsqu'une entreprise fabrique un produit qui n'est pas destiné au niveau aval immédiat mais à un niveau plus éloigné de l'EV, nous pouvions introduire des nœuds fictifs qui auraient pour rôle de normaliser notre structure. Nous n'avons pas traité le comportement spécifique de ces nœuds fictifs dans le cadre de cette thèse. Ce problème n'est pas aussi simple qu'il y paraît. En effet, le nœud réel de niveau r correspondant à ce nœud fictif de niveau k participe à la répartition des produits à fabriquer de niveau r mais à la répartition des composants de niveaux k . Par ailleurs, il faut faire attention aux décalages temporels qui doivent être annulés quand on a affaire à un nœud fictif.

Notre travail est une proposition d'architecture de recherche de plannings cohérents. Nous avons eu l'occasion de tester la faisabilité de certaines parties, mais à un stade d'avancement intermédiaire de nos idées, et nous n'avons pas jugé utile de les décrire en détail dans ce document. Il serait intéressant, moyennant des moyens informatiques en conséquence, de réaliser et d'implanter l'ensemble de l'architecture proposée dans l'état actuel de nos réflexions. Cette architecture devrait être validée sur plusieurs structures d'entreprises virtuelles en partant des plus simples avec seulement deux niveaux et tout produit qui n'est fabriqué que par une entreprise au cas les plus généraux.

Par ailleurs, pour tester l'intérêt réel de cette approche dans le cadre d'un plan glissant et en présence de prévisions qui évoluent au cours de temps, il serait également souhaitable de simuler l'utilisation répétée de construction de plannings en présence de prévisions générées aléatoirement dans le cadre de loi de probabilités paramétrées.

LISTE DES TABLES
&
FIGURES

Liste des tables et figures

Figure I-1 : Exemple de chaîne logistique	14
Figure I-2 : Exemple d'entreprise étendue	21
Figure I-3 : Exemple d'entreprise virtuelle	21
Figure I-4 : Schéma de négociation de Macchiaroli et Riemma	38
Tableau I-1 : Tableau récapitulatif des travaux utilisant les systèmes multi agents pour la modélisation des chaînes logistiques	41
Figure II-1 : Architecture de l'entreprise virtuelle par niveaux, ici 4 niveaux	51
Figure II-2 : Planification sur un horizon glissant	54
Figure II-3 : Recherche d'une solution planifiée d'un NEV	58
Figure II-4 : Recherche d'une solution planifiée d'un niveau	59
Figure II-5 : Les différents coûts d'une solution planifiée	60
Figure II-6 : Construction d'un scénario aval de rang k	61
Figure II-7 : Construction d'un scénario amont de rang k	62
Figure II-8 : Principe de construction d'un planning d'un NEV	64
Figure II- 9 : Le mode de planification directe	65
Figure II-10 : Le mode de planification rétrograde	66
Figure II-11 : Le mode de planification contraint	67
Figure II-12 : Problème de répartition de composants sur les NEV d'un même niveau	73
Figure II-13 : Problème de répartition de produits sur les NEV d'un même niveau	74
Figure II-14 : Construction de courbes cumulées d'un niveau k	76

Figure II-15 : Calcul du coût d'une solution planifiée de niveau	77
Figure II-16 : Exemple de construction de scénarios aval de rang 1	86
Figure II-17 : Exemple de construction d'un scénario amont de rang N.	88
Figure II- 18 : Exemple d'une génération d'un ensemble de solutions à partir d'une CCLD (cas d'un seul produit)	95
Figure III-1 : Modèle de l'entreprise virtuelle par des systèmes multi-agents	107
Figure III-2 : Processus de planification et de négociation d'un NEV	109
Figure III-3 : Rôle du NAL	110
Tableau III-1 : Abréviations utilisées dans les statecharts	127
Figure III-4 : Statechart de l'Agent Planificateur	128
Figure III-5 : Statechart de l'Agent Négociateur	129
Figure III-6 : Statechart de l'Agent Négociateur de Niveau	131

LISTE DES PUBLICATIONS

Latifa Ouzizi, Didier Anciaux, Marie Claude Portmann, François Vernadat, (b) 2003, A model for co-operative planning within a virtual enterprise, accepté à International Journal of Computer Integrated Manufacturing IJCIM

L.Ouzizi, D. Anciaux, M. Chafai, M. C. Portmann, F. Vernadat, 2003, Formalisation de la négociation pour la planification d'une entreprise virtuelle, Colloque International sur la Production Intégrée CPI, Meknès. Accepté à être publié dans Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA).

Roy Daniel, Anciaux Didier, Monteiro Thibaud, **Ouzizi Latifa**, 2004, Multi-agent architecture for supply chain management, Journal of Manufacturing Technology Management, 15, (8), 745-755.

L.Ouzizi, D. Anciaux, M C Portmann, F. Vernadat,(a) 2003, A model for co-operative planning within a virtual enterprise, International Conference on Industrial engineering and Production Management (IEPM) Porto 2003

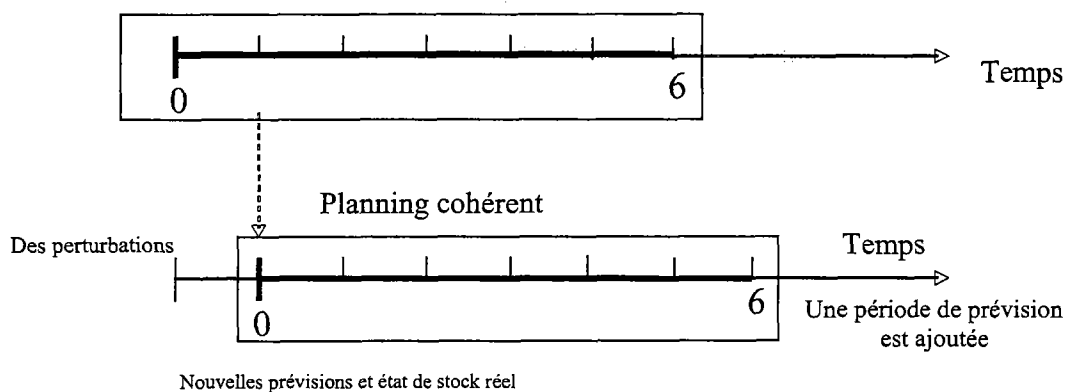
D. Anciaux, **L. Ouzizi** et M.C. Portmann , Planification d'une Chaîne Logistique par Négociation, 2003, Congrès International du Génie industriel au Canada (octobre)

ANNEXE

INTRODUCTION

L'objectif de cette annexe est de présenter un outil pouvant assister chaque NEV pour l'établissement de son planning et la proposition de solutions planifiées suite à de nouvelles prévisions. Nous nous intéressons au cas particulier de la planification rétrograde. Dans ce cas, les courbes cumulées de livraison sont des données impératives à respecter par le NEV tandis que les courbes cumulées d'approvisionnement sont des contraintes moins dures (éventuelles pénalités d'avance).

On suppose que le NEV avait un planning faisable sur un horizon de 6 périodes. La planification concerne deux produits et deux composants, et qu'une période vient de se dérouler :



Ayant une capacité finie en heures normales, en heures supplémentaires par période et de quantités sous-traitées par période et par produit, l'objectif est retrouver plusieurs plannings faisables ou avec peu de retards ou d'avances en utilisant un algorithme génétique.

Nous étudions le cas d'un système de production à une machine en négligeant les temps de réglages.

1. Principe de l'algorithme génétique

1.1 Codage et génération de la population

Comme nous l'avons déjà signalé au niveau du chapitre2, nous utilisons un codage indirect, ce qui veut dire que le contenu de chaque chromosome est différent de la solution. Pour trouver des solutions on utilisera un générateur de solution. Comme nous l'avons déjà dit au chapitre2, le chromosome contient des courbes cumulées de livraison (CCLV) générés suivant l'algorithme suivant :

```

Pour chaque produit
RESTE = MAXQ
CCLvar0 = 0
Pour t variant de 1 à T-1 faire
    % générer l'augmentation de CCQ entre 0 et 1,5 fois l'augmentation moyenne jusqu'à la fin
    % de la courbe %
     $Q_t = 1,5 * \text{Uniforme}(1, \text{RESTE}) / (T+1-t) ;$ 
    % ajouter l'augmentation à la courbe %
     $\text{CCLvar}_t = \text{CCLvar}_{t-1} + Q_t$ 
    % corriger la courbe si elle sort des limites retenues %
    Si  $\text{CCLvar}_t < \text{CCLMin}_t$ 
        Alors  $\text{CCLvar}_t = \text{CCLMin}_t$ 
    Sinon
        Si  $\text{CCLvar}_t > \text{CCLMax}_t$ 
            Alors  $\text{CCLvar}_t = \text{CCLMax}_t$ 
    Finsi
    Finsi
    % corriger la hauteur des augmentations restantes à faire sur CC %
     $\text{RESTE} = \text{MAXQ} - \text{CCLvar}_t$ 
Finpour t
     $\text{CCLvar}_t = \text{MAXQ}$ 

```

1.2 Génération des solutions

Le générateur de solution que nous utilisons est une méthode approchée par construction que nous avons conçue. Il consiste dans un premier temps d'utiliser les heures normales période par période. Dans le cas où la charge dépasse les heures normales, on raisonne en heures supplémentaires période par période. Dans le cas où, on a toujours la charge induite par les CCLD dépasse les heures supplémentaires disponibles, on recourt à la sous-traitance. Cet algorithme est bien sûr valable sous les hypothèses que nous avons prises.

Ainsi, à partir des contraintes de production, de pénalités et des courbes cumulées amont et aval (CCAD et CCLD), le générateur proposé donne une solution pouvant être bonne.

Du moment que les produits se partagent la ressource, nous allons raisonner en charge globale de la ressource. En supposant qu'on planifie au plus tard, l'algorithme de génération de solution ressort des plannings en terme d'heures normales, heures supplémentaires, heures inemployées, les quantités à sous-traiter et d'éventuels retards ou avances.

En utilisant les mêmes notations présentés auparavant, l'algorithme est comme suit :

Pour chaque chromosome
Pour chaque période
 Calculer la charge induite par les CCLD de tous les produits : $charge(t)$ (pas en cumulé)
 $t = H_p$ %horizon de planification
 Tant que $t < H_p$ faire
 $heures_normales(t) = \min(CapaciteHN(t), charge(t))$
 $heures_inemployées(t) = \max(0, (CapaciteHN(t) - charge(t)))$
 $charge(t-1) = charge(t-1) + \max(0, charge(t) - CapaciteHN(t))$
 $t = t - 1$
 fin tant que
 $chargeheursup = charge(1) - CapaciteHN(1)$ % la charge dépassant les heures normales disponibles sur l'horizon étudié
 $t = H_p$
 Tant que ($t < H_p$ et $chargeheursup > 0$) faire
 $heures_sup(t) = \min(MaxOT(t), chargeheursup)$
 $chargeheursup = chargeheursup - heures_sup(t)$
 $t = t - 1$
 fin tant que

 Si $chargeheursup > 0$ alors % si les heures supplémentaires ne suffisent pas pour couvrir toute la charge on recourt à la sous-traitance. Les produits sont sous-traités par priorité selon le critère rapport coût de sous-traitance et temps de production unitaire croissant.
 On applique après la procédure :
Procédure Eval-locale après avoir converti la charge (t) en quantité du produit le plus prioritaire à être sous-traité.

A partir des données de chaque solution, nous déduisons le coût de chaque chromosome ce qui constitue la fonction d'évaluation.

Nous signalons que, pour chaque chromosome, nous pénalisons très fort les retards de livraison de produits finis pour les éviter et en même temps, nous pénalisons les avances en composants. On ne tient pas en compte du coût de stockage.

Dans la suite, nous allons tout d'abord présenter un exemple d'établissement de planning d'un NEV, par la suite un exemple de coordination entre deux NEVs

2. Expérimentations

2.1 Exemple de planification rétrograde d'un NEV

A travers cet exemple, nous illustrons un outil pouvant assister un agent planificateur, pour la génération d'un planning de production facile et rapide selon différentes modalités de planification que le négociateur de niveau lui impose. L'objectif est d'optimiser les coûts de production en terme de coût d'heures supplémentaires, de coût de sous-traitance et de coût des heures inemployées.

Pour une planification rétrograde, nous supposons que :

- les courbes cumulées de livraison sont imposées CCLD, dans ce cas, les retards sont interdits (très pénalisés),
- les courbes cumulées d'approvisionnement sont calculées CCAV, mais ne doivent pas dépasser ce qui est prévu pour la première période.

Sous ces conditions, nous supposons que le NEV produit deux produits P1 et P2. P1 utilise deux unités de composant C1 et une unité de composant C2, P2 utilise une unité de composant C1.

2.1.1 Les données du système de production du NEV

Nous signalons que les données sont prises d'une façon aléatoire, ils ne reflètent aucune donnée réelle.

Les données du système de production et des coûts de chaque produit sont :

Produit	Cadence de production
P1	40p/h
P2	60p/h

La capacité normale de la ressource :

Pour tout t de l'horizon de planification

$$C(t) = 30 (6 \times 5)$$

Le maximum d'heures supplémentaires :

Pour tout t de l'horizon de planification

$$MaxOT(t) = 10$$

Le maximum de quantités à sous-traiter :

Pour tout t de l'horizon de planification

$$MaxSC(P1, t) = 100$$

$$MaxSC(P2, t) = 200$$

Les différents coûts pris en compte :

Coût d'une heure normale	Le coût d'une heure supplémentaire	Le coût d'une heure inemployée	Le coût de sous-traitance d'une unité de produit P1	Le coût de sous-traitance d'une unité de produit P2
10	15	13	10	5

2.1.2. Quelques exemples d'élaboration de solutions planifiées

Demande initiale

CCLD(P1) = (250, 550, 900, 1000, 1400, 2200)

CCLD(P2) = (1000, 1500, 2700, 5000, 6800, 7900)

Si le NEV planifie en juste à temps alors la solution détaillée sera :

Si le NEV planifie en juste à temps alors la solution détaillée sera :	
Coût d'heures normales de production	= 1575
Coût d'heures supplémentaires	= 425
Coût de sous-traitance	= 333,333333
Coût d'heures inemployées	= 292,5
Le coût de retard	= 0
Le coût global de la solution planifiée	= 2625,83333

CCAV(C1) = (1500, 2600, 4500, 7000, 9600, 12300)

CCAV(C2) = (250, 550, 900, 1000, 1400, 2200)

Avec l'algorithme génétique, qui génère les plannings d'une façon aléatoire, donne la meilleure solution :

CCLV(P1) = (478, 1278, 1378, 1744, 2123, 2200)

CCLV(P2) = (1603, 2192, 4492, 6194, 7342, 7900)

Coût d'heures normales	= 1596,5
Coût d'heures supplémentaires	= 392,75
Coût de sous-traitance	= 333,333333
Coût d'heures inemployées	= 264,55
Coût de retard	= 0
Le coût global de la solution planifiée	= 2587,13333

Les courbes cumulées d'approvisionnement engendrées par la solution sont :

CCAV(C1) = (2559, 4748, 7248, 9682, 11588, 12300).

CCAV(C2) = (478, 1278, 1378, 1744, 2123, 2200).

La solution planifiée générée par l'algorithme génétique est meilleure que celle si le NEV produit ce qui est demandé néanmoins, les livraisons d'approvisionnements doivent être au plus tôt.

2^{ème} demande :

Dans ce cas, on suppose que les courbes cumulées d'approvisionnements sont limitées. Soit la demande initiale sous la forme :

CCAD(C1) = (1500, 2000, 4000, 6000, 9500, 12600)

CCAD(C2) = (370, 540, 1000, 1100, 1350, 2220)

Pénalité d'avance = 2€/u/période ; pénalité de retard (P1) = 6€/u/période et pénalité de retard (P2) = 8€/u/période.

L NEV peut proposer plusieurs solutions avec des coûts différents, nous en citons deux :

1^{ère} proposition : elle contient un compromis entre les retards et les avances

CCLV(P1) = (100, 200, 852, 1029, 1245, 2200)	
CCLV(P2) = (500, 2800, 3300, 5600, 7014, 7900)	
Coût des heures normales de production = 1544,33333	
Coût d'heures supplémentaires	= 429,625
Coût de sous-traitance	= 1410,83333
Coût des heures inemployées	= 332,366667
Coût de retard	= 8218
Coût d'avance	= 7732
Le coût globale de la solution planifiée = 19667,1583	
CCAV(C1) = (700, 3200, 5004, 7658, 9504, 12300)	
CCAV(C2) = (100, 200, 852, 1029, 1245, 2200)	

2^{ème} proposition favorise plus les livraisons non retardées par rapport aux avances :

CCLV(P1) = (137, 237, 938, 1143, 1371, 2200)	
CCLV(P2) = (976, 1476, 3230, 5530, 7626, 7900)	
Coût des heures normales de production = 1576,16667	
Coût d'heures supplémentaires	= 371,375
Coût de sous-traitance	= 1620,83333
Coût des heures inemployées	= 290,983333
Coût de retard	= 6730
Coût d'avance	= 9454
Le coût globale de la solution planifiée = 20043,3583	
CCAV(C1) = (774, 3274, 5176, 7886, 9827, 12300)	
CCAV(C2) = (137, 237, 938, 1143, 1371, 2200)	

En utilisant le même principe (génération des NEVs des solutions planifiées détaillées), un négociateur de niveau peut choisir entre plusieurs solutions planifiées proposées par les NEVs de son niveau la solution la moins coûteuse pour tous les NEVs.

Le principe consiste à tester les combinaisons des solutions planifiées proposées par les NEV. Dans le cas d'infaisabilité, il propose à quelques uns des retards ou d'anticipation de composants.

Nous allons considérer le cas de deux NEVs se partageant deux composants : le premier NEV a les conditions de production cités auparavant et le deuxième produit un seul produit P3. P3 utilise deux unités en composant C1 et deux unités en composant C2.

2.2 Coordination entre deux NEVs

2.2.1. Les données du système de production du NEV2

Les données du système de production et des coûts de chaque produit sont :

Produit	Cadence de production
P3	50p/h

La capacité normale de la ressource :

Pour tout t de l'horizon de planification

$C(t) = 25 \text{ (} 5 \times 5 \text{)}$

Le maximum d'heures supplémentaires :

Pour tout t de l'horizon de planification

$MaxOT(t) = 8$

Le maximum de quantités à sous-traiter :

$maxSC(P3, 1) = 50$

$maxSC(P3, 2) = 120$

$maxSC(P3, 3) = 100$

$maxSC(P3, 4) = 80$

$maxSC(P3, 5) = 100$

$maxSC(P3, 6) = 100$

Les différents coûts pris en compte :

Coût d'une heure normale	Le coût d'une heure supplémentaire	Le coût d'une heure inemployée	Le coût de sous-traitance d'une unité de produit P3
12	14.5	13	8

Si la demande de l'AN du NEV2 à son agent planificateur est :

< L'AN, l'AP, CCLD(P3), non acceptation de retard, non contraintes sur les approvisionnements>.

$CCLD(P3) = (400, 1050, 1950, 3306, 5696, 9798)$

Après planification, l'AP répond à l'AN :

<L'AP, L'AN, CCLV=CCLD, CCAV, coût de la solution = 4239,72> avec le détail des différents coûts

Coût d'heures normales de production	= 1800
Coût d'heures supplémentaires	= 599,72
Coût de sous-traitance	= 1840
Coût d'heures inemployées	= 0
Le coût de retard	=0
Le coût global de la solution planifiée	= 4239,72

CCAV(C1) = (3400, 6392, 9892, 13352, 16606, 19596)

CCAV(C2) = (3400, 6392, 9892, 13352, 16606, 19596)

2.2.2. Coordination entre les deux NEVs

Dans ce cas, nous supposons que les courbes cumulées de livraisons du niveau sont imposées et les courbes cumulées d'approvisionnement du niveau sont limitées.

Disposant d'une CCAD_NIV (C1) = (6600, 10900, 17300, 22800, 28300, 31800)

Et de CCAD_NIV (C2) = (4400, 7100, 11200, 15600, 19500, 22400)

Après une répartition aléatoire (fonction Random) des composants entre les NEVs comme suit :

Les CCAD pour le NEV2 sont :

CCAD(C1) = CCAD(C2) = (4000, 6300, 10000, 14000, 17500, 20000)

Pour le NEV1

CCAD(C1) = (2600, 4600, 7300, 8800, 10800, 11800)

CCAD(C2) = (400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400)

Les deux NEVs après planification peuvent proposer plusieurs solutions, nous en donnons deux de chacun. Les solutions sont générées par l'algorithme génétique décrit auparavant.

1^{ère} proposition du NEV1 :

CCLV(P1)	= (431, 831, 1304, 1704, 2104, 2200)
CCLV(P2)	= (821, 1755, 3681, 5804, 6648, 7900)
Coût des heures normales de production	= 1573,58333
Coût d'heures supplémentaires	= 300
Coût de sous-traitance	= 3292,5
Coût des heures inemployées	= 294,341667
Coût de retard	= 2648

Coût d'avance	= 2684
Le coût globale de la solution planifiée = 10792,425	
CCAV(C1) = (1683, 3417, 6289, 9212, 19856, 12300)	
CCAV(C2) = (431, 831, 1304, 1704, 2104, 2200)	

2^{ème} proposition du NEV1 :

CCLV(P1) = (404, 804, 1269, 1658,33333, 2069, 2200)	
CCLV(P2) = (726, 1586, 3490, 5656, 6533, 7900)	
Coût des heures normales de production = 1574,75	
Coût d'heures supplémentaires	= 300
Coût de sous-traitance	= 3257,5
Coût des heures inemployées	= 292,825
Coût de retard	= 4328
Coût d'avance	= 1754
Le coût globale de la solution planifiée = 11507,075	
CCAV(C1) = (1534, 3194, 6028, 8972.66667, 10671, 12300)	
CCAV(C2) = (404, 804, 1269, 1658,33333, 2069, 2200)	

La différence entre les deux propositions, à part la légère différence de coût, consiste dans le compromis désiré entre coût de retard et coût d'avance des composants.

De même pour le NEV2, nous citons deux propositions selon les conditions qu'on lui impose :

1^{ère} proposition du NEV2 :

CCLV(P3) = (1700, 3029, 4637, 6367, 8117, 9798)	
Coût des heures normales de production = 1800	
Coût d'heures supplémentaires	= 590,73
Coût de sous-traitance	= 2088
Coût des heures inemployées	= 0
Coût de retard	= 0
Coût d'avance	= 116
Le coût globale de la solution planifiée = 4594,73	
CCAV(C1) = (3400, 6058, 9274, 12734, 16234, 19596)	
CCAV(C2) = (3400, 6058, 9274, 12734, 16234, 19596)	

2^{ème} proposition du NEV2 :

$CCLV(P3) = (874, 1384, 2673, 4403, 6153, 9798)$

Coût des heures normales de production = 1532,16

Coût d'heures supplémentaires = 359,31

Coût de sous-traitance = 2240

Coût des heures inemployées = 290,16

Coût de retard = 0

Coût d'avance = 0

Le coût globale de la solution planifiée = 4421,63

$CCAV(C1) = (1748, 2768, 5346, 8806, 12306, 19596)$

$CCAV(C2) = (1748, 2768, 5346, 8806, 12306, 19596)$

L'agent négociateur de niveau a affaire à choisir la meilleure solution pour chaque NEV avec une optimisation des dates des besoins des composants et des coûts de retard.

La 1^{ère} solution est de prendre les solutions les moins coûteuses pour les NEVs mais reste à vérifier la disponibilité des composants. Dans le cas contraire, teste une autre combinaison de solutions proposées et choisir la solution la plus intéressante du point de vue coût. En effectuant les calculs sur les périodes de besoin de composants, on s'aperçoit qu'avec la combinaison des solutions moins coûteuses les NEV n'ont pas besoin de plus que ce qui est proposé par le coordinateur.

Nous pouvons faire beaucoup de tests de ce type pour voir l'intérêt d'une planification collaborée entre les partenaires ce qui optimise les coûts de chaque partie.

De même, il a fallu travailler avec les algorithmes génétiques plus d'autres métaheuristiques pour l'amélioration des solutions proposées par les NEVs.

La comparaison des solutions sera plus intéressante si on travaille sur des données réelles ou proches de la réalité pour avoir des résultats significatifs.

Planification de la production par co-décision et négociation au sein d'une entreprise virtuelle

Dans cette thèse, nous abordons un problème lié à l'évolution du tissu industriel qui s'organise en réseaux d'entreprises coordonnant leurs activités pour la fabrication d'un même produit fini.

Après une étude bibliographique détaillée sur la modélisation, la coordination et la planification au sein des chaînes logistiques en général et sur l'entreprise virtuelle (EV) en particulier, nous axons notre travail de recherche sur la modélisation et la planification, collaborée et coordonnée, de la production d'une entreprise virtuelle.

Notre travail consiste à proposer d'une part une architecture de l'entreprise virtuelle par niveau et, d'autre part, des modèles de planification qui permettent d'assurer un plan de production faisable et quasi optimal suivant l'architecture proposée. Ceci est réalisé d'abord en coordonnant les plannings des entreprises d'un même niveau, puis en coordonnant les plannings de chaque niveau avec ceux des niveaux amont et aval.

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé un ensemble de définitions des données que nous avons utilisées et que nous jugeons nécessaires pour une modélisation quasi complète des processus de planification au sein de l'entreprise virtuelle. La définition des prévisions et des contrats avec l'extérieur permet de connaître l'environnement externe de l'EV. De même, les définitions des courbes cumulées, des contrats et des modèles de coût utilisés par les partenaires permettent de connaître l'environnement interne à l'EV ainsi que les objectifs retenus pour une entreprise virtuelle.

Pour décrire un processus global de planification de l'EV d'une façon progressive, nous avons commencé par la description du fonctionnement d'un nœud de l'EV en spécifiant ses différents problèmes de planification et proposant des modèles d'optimisation pour la minimisation des coûts de production. Ensuite, nous avons étudié les problèmes de planification sur un niveau et nous avons décrit et modélisé la coordination entre les nœuds de même niveau. Enfin, nous pouvons décrire le processus itératif de planification globale de toute la chaîne de production.

Afin de réussir la coordination au sein de l'entreprise virtuelle, nous avons utilisé la négociation et la médiation. La négociation permet aux partenaires d'élargir le champ des possibilités de planning. Tandis que la médiation permet, par une relaxation de contraintes, de résoudre les conflits en cas de non convergence des négociations.

Pour la mise en place des modèles de planification interactifs et mettre en évidence l'aspect distribué et centralisé du modèle de planification proposé, nous avons utilisé l'approche multi-agents. Après une description des différents agents constituant notre architecture ainsi que leurs fonctionnalités, nous nous sommes focalisés sur la description des différents comportements des agents en fonction des sollicitations qu'ils subissent, les données et les messages assurant les communications entre agents.

Mots clés : Entreprise virtuelle, coordination, modélisation, planification opérationnelle, optimisation, systèmes multi-agents.

Production planning using co-decision and negotiation within a virtual enterprise

In this thesis, we are interested to a problem related to the evolution of the industrial production which is organized in networks of enterprises coordinating their activities to produce the same finished product.

After a detailed bibliographical study on modelling, coordination and planning within supply chains in general and on the virtual enterprise (VE) in particular, we centred our research task on collaborated and coordinated production's modelling and planning of a virtual enterprise.

Our work consists in proposing on the one hand an architecture of the virtual enterprise by level and, on the other hand, models of planning which make it possible to ensure a plan of feasible and quasi optimal production planning according to the architecture suggested. This is carried out initially by coordinating enterprise's plannings of the same level, then by coordinating plannings of each level with those of upstream and downstream levels.

To achieve our goal, we proposed a whole of definitions of data which we used and which we consider necessary for a quasi complete modelling of planning processes within the virtual enterprise. The definition of forecasts and contracts with outside make it possible to know the external environment of the VE. In the same way, definitions of cumulated curves, contracts and models of cost used by the partners make it possible to know the internal environment with the VE as well as the retained objectives for a virtual enterprise.

To describe a global planning process of the VE in a progressive way, we start with the description of a node of the VE by specifying its various planning problems and proposing optimization models to minimize the production costs. Then, we studied problems of planning on a level by describing and modelling coordination between nodes of the same level. At the end, we describe the iterative process of supply chain planning.

In order to assure coordination within the virtual enterprise, we use negotiation and mediation. Negotiation permits to partners to wide the field of planning. While mediation permits, using constraints relaxation, to solve conflicts in the event of no convergence of negotiations.

To highlight distributed and centralized models of planning, we used the multi-agents approach. After a description of the different agents constituting our architecture and their functionalities, we describe the various behaviours, data and messages used by the agents to ensure communications between them.

Key words: Virtual Enterprise, coordination, modelling, operational planning, optimization, multi-agents systems.