

# THESE

PRESENTEE A

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES  
ET DE L'INGENIEUR

Par **Mme Thècle LECOMPTE-ALIX**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPÉCIALITÉ : AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE, SIGNAL et IMAGE

---

## UN CADRE FORMEL DE DECISION POUR LA PLANIFICATION MULTI-NIVEAU DES SYSTEMES DE PRODUCTION RETICULAIRES

---

Soutenue le 14 décembre 2001

Après avis de M.	<b>JEAN-PIERRE CAMPAGNE</b> Professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Étienne,	Rapporteur
Mme	<b>COLETTE MERCE</b> Professeur à l'INSA de Toulouse	Rapporteur
Devant la commission d'examen formée de :		
MM.	<b>GUY DOUMEINGTS,</b> Professeur à l'Université Bordeaux I	Président
	<b>CHRISTIAN BERARD,</b> Maître de Conférences à l'Université Bordeaux I	Examineur
	<b>JEAN-PAUL BOURRIERES,</b> Professeur à l'Université Bordeaux I	Directeur de thèse
	<b>JEAN-PIERRE CAMPAGNE,</b> Professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Étienne,	Rapporteur
	<b>JEAN JACQUES LESAGE,</b> Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan,	Examineur
Mme	<b>COLETTE MERCE,</b> Professeur à l'INSA de Toulouse	Rapporteur



A Michel



---

## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été menés au Laboratoire d'Automatique et de Productique (LAP) de l'Université Bordeaux I. A ce titre, je tiens à remercier Monsieur Guy DOUMEINGTS, Professeur à l'Université Bordeaux 1, anciennement Directeur du LAP et Monsieur Alain OUSTALOUP, Professeur à l'ENSEIRB, actuel Directeur du LAP pour m'avoir permis d'accomplir ma thèse dans des conditions idéales, et pour m'avoir soutenue durant toute la durée de mon passage dans le laboratoire.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Jean-Paul Bourrières, Professeur à l'Université Bordeaux 1, pour avoir encadré ce travail de thèse avec beaucoup d'attention, d'enthousiasme et de disponibilité. Ses conseils avisés m'ont été d'un grand soutien tout au long de ces années de thèse et notamment en ce qui concerne la rédaction scientifique de ce mémoire.

Je souhaite remercier Madame Colette Mercé, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse et Monsieur Jean-Pierre Campagne Professeur à l'Ecole des Mines de Saint Etienne pour avoir accepté de juger ce mémoire, pour l'attention et les remarques constructives qu'ils ont apportées. Je remercie également Monsieur Jean-Jacques Lesage, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan pour avoir examiné mes travaux et dont les commentaires avisés m'ont permis d'entrevoir d'autres pistes de recherche.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Christian Bérard, Maître de Conférences à l'Université Bordeaux I pour ses encouragements, pour la confiance qu'il m'a accordée et la bonne humeur qu'il a su maintenir durant nos nombreux échanges. A messieurs Jean-Christophe Deschamps et Marc Zolghadri Maîtres de Conférences à l'Université Bordeaux I pour les longues conversations que nous avons eues.

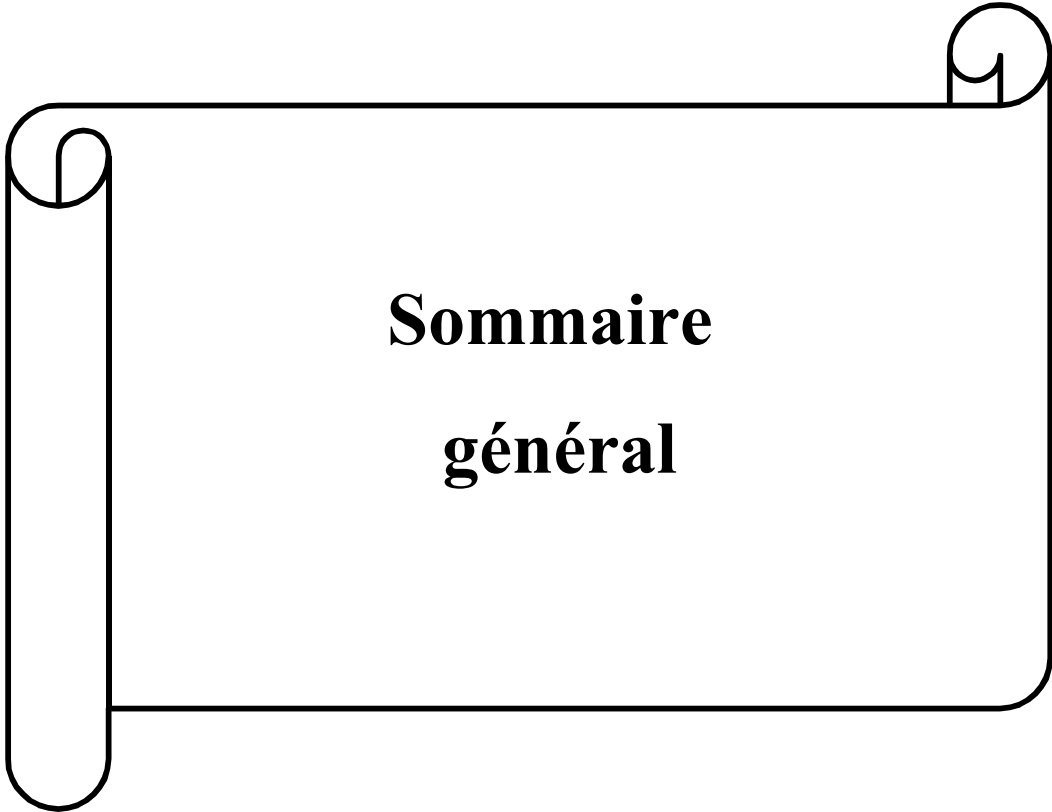
Mes remerciements vont également à tous les membres du LAP et de GRAISOFT, pour leur sympathie et leur accueil chaleureux. J'adresse mes plus sincères remerciements à Aude, Ashkan, Paul-Eric, Paul, Matthieu et Séverine mes compagnons privilégiés, pour m'avoir supportée et soutenue durant ces années et pour tous les bons moments partagés.

A ma famille, mes parents, mon mari va toute ma reconnaissance pour leur soutien sans faille, leur patience, et pour m'avoir encouragée à persévérer dans ce travail.

---

---

---



**Sommaire  
général**

---



---

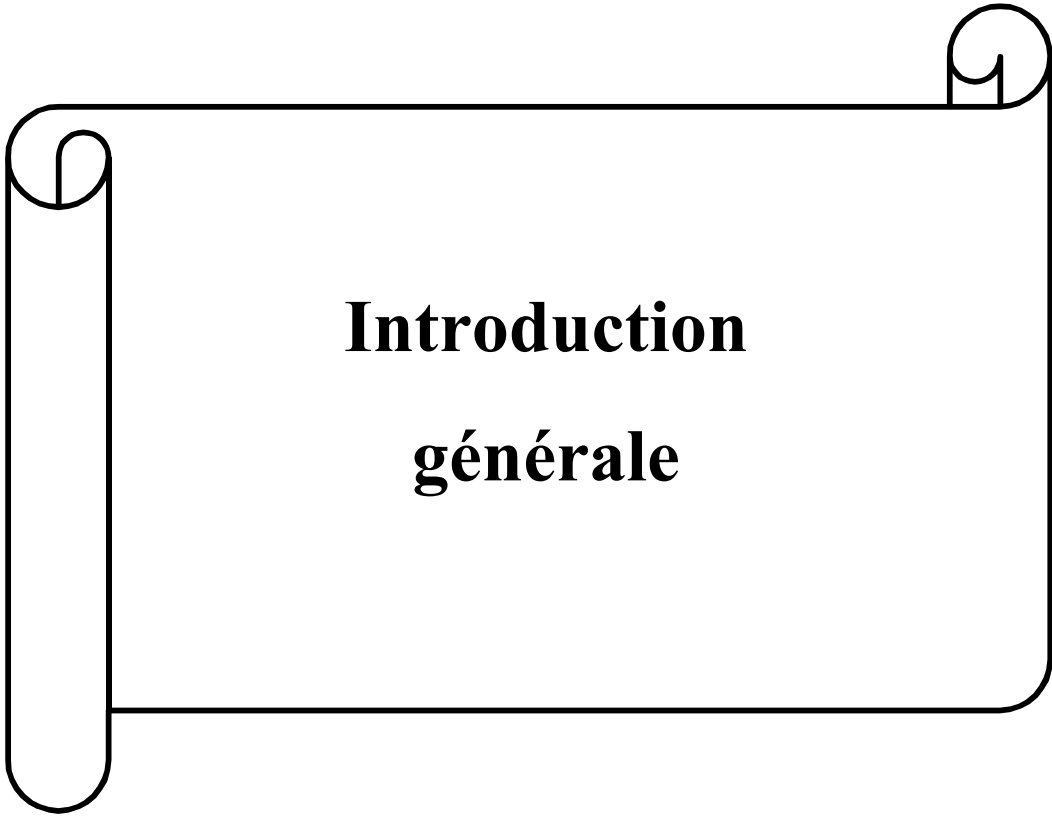
## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>8</b>
<b>INTRODUCTION À LA PARTIE 1</b> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1 : LE CONTEXTE DE PRODUCTION ACTUEL</b> .....	<b>17</b>
<b>1 L'ÉVOLUTION DE L'APPAREIL PRODUCTIF</b> .....	<b>17</b>
1.1 1900 - 1960 : « PRODUIRE » (LES SOIXANTE GLORIEUSES).....	17
1.2 1960 - 1980 : « PRODUIRE CE QUI SERA VENDU » .....	17
1.3 1980 - 1995 : « PRODUIRE CE QUI EST DÉJÀ VENDU » .....	18
1.4 CONCLUSION.....	21
<b>2 L'APPAREIL PRODUCTIF MODERNE 1995 - ..... " Vendre et servir"</b> .....	<b>21</b>
2.1 LES CARACTÉRISTIQUES DE PRODUCTION.....	21
2.2 LES STRATÉGIES D'ENTREPRISES.....	23
2.3 LES RÉSEAUX INFORMATIQUES SUPPORTS AUX RÉSEAUX DE PRODUCTION.....	23
2.4 L'OFFRE EN OUTILS DE GESTION .....	24
<b>3 CONCLUSION</b> .....	<b>27</b>
<b>CHAPITRE 2 : LA CONDUITE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION</b> .....	<b>29</b>
<b>1 LA GESTION DE PRODUCTION</b> .....	<b>29</b>
1.1 DÉCOMPOSITION DU SYSTÈME DE GESTION DE PRODUCTION.....	29
1.2 LA FONCTION PLANIFICATION.....	31
<b>2 LES APPROCHES DE PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION</b> .....	<b>32</b>
2.1 LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION.....	32
2.2 L'ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION.....	37
2.3 LES APPROCHES INTÉGRÉES DE PLANIFICATION/ORDONNANCEMENT.....	38
2.4 CONCLUSION.....	39
<b>3 LES APPROCHES MULTI-SITE</b> .....	<b>40</b>
3.1 LA PLANIFICATION MULTI-SITE .....	40
3.2 LES ARCHITECTURES DE RÉFÉRENCES.....	45
3.3 LES SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION DE PRODUCTION .....	49
3.4 CONCLUSION.....	51
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 1</b> .....	<b>53</b>
<b>INTRODUCTION À LA PARTIE 2</b> .....	<b>61</b>
<b>CHAPITRE 3 : ARCHITECTURE DE PLANIFICATION MULTI-NIVEAU DES SYSTÈMES RÉTICULAIRES DE PRODUCTION</b> .....	<b>63</b>
<b>1 LES PRESTATAIRES D'UNE ENTREPRISE</b> .....	<b>63</b>
1.1 L'EXTERNALISATION DES ACTIVITÉS OU OUTSOURCING.....	63
1.2 L'ACHAT DE FOURNITURES .....	64
1.3 LES RELATIONS INTER-ENTREPRISES .....	65
<b>2 LA MODELISATION D'ENTREPRISE</b> .....	<b>65</b>
2.1 LE MODÈLE GRAI EN TANT QU'OUTIL DE MODÉLISATION D'ENTREPRISE .....	66
2.2 LE CENTRE DE CONDUITE .....	67
2.3 LES INTERRELATIONS ENTRE CENTRES DE CONDUITE.....	70
2.4 LES INTERFACES DES CENTRES DE CONDUITE.....	71
<b>3 CONCEPT DE CONDUITE HIERARCHISÉE</b> .....	<b>73</b>
3.1 ARCHITECTURE DE CONDUITE HIÉRARCHISÉE.....	73
3.2 ARCHITECTURE DE CONDUITE GÉNÉRALISÉE.....	74

3.3	FONCTIONNEMENT DE L'ARCHITECTURE DE CONDUITE GÉNÉRALISÉE .....	75
<b>4</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>77</b>
<b>CHAPITRE 4 : UN MODÈLE GÉNÉRALISÉ POUR LE CALCUL BESOIN/CHARGE</b> .....		<b>79</b>
<b>1</b>	<b>CALCUL DE BESOIN / CALCUL DE CHARGE</b> .....	<b>81</b>
1.1	LES BESOINS NETS : PHASE 1.....	81
1.2	LE CALCUL DE CHARGE : PHASE 2 .....	82
1.3	LES APPROVISIONNEMENTS : PHASE 3.....	82
<b>2</b>	<b>MODÈLE ALGÈBRE DE PRODUCTION</b> .....	<b>83</b>
2.1	MODÉLISATION DES PROCESSUS DE TRANSFORMATION.....	83
2.2	EQUATION DE PRODUCTION GÉNÉRALISÉE .....	84
<b>3</b>	<b>MODÈLE ALGÈBRE DU CADRE DE DÉCISION</b> .....	<b>84</b>
3.1	PROBLÉMATIQUE D'INVERSION.....	84
3.2	CONSTRAINTES SUR LES VARIABLES.....	85
3.3	MODÈLE INVERSE DE PRODUCTION.....	85
3.4	PROBLÉMATIQUE D'OPTIMISATION.....	90
<b>4</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>92</b>
<b>CHAPITRE 5 : ALLOCATION DE CHARGE</b> .....		<b>95</b>
<b>1</b>	<b>MODÉLISATION DES RESSOURCES</b> .....	<b>96</b>
1.1	DÉFINITION DES RESSOURCES.....	96
1.2	CARACTÉRISATION DES RESSOURCES DE TRANSFORMATION .....	97
1.3	CARACTÉRISATION DES RESSOURCES DE TRANSPORT.....	101
<b>2</b>	<b>ALLOCATION COHERENTE DE CHARGE</b> .....	<b>103</b>
2.1	LES TABLEAUX DE BORD.....	104
2.2	TABLE D'ALLOCATION .....	104
2.3	EQUATION GÉNÉRALISÉE DES STOCKS .....	105
2.4	RÈGLES DE COHÉRENCE .....	106
<b>3</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>108</b>
<b>CHAPITRE 6 : RÉCURSIVITÉ DU MODÈLE DE DONNÉES</b> .....		<b>111</b>
<b>1</b>	<b>L'INTÉGRATION VERTICALE DES MODELES DE DONNÉES</b> .....	<b>113</b>
1.1	INTRODUCTION.....	113
1.2	MODÈLE DE DÉSAGRÉGATION DES PROCESSUS.....	114
<b>2</b>	<b>L'INTÉGRATION HORIZONTALE DES MODELES DE DONNÉES</b> .....	<b>120</b>
2.1	INTÉGRATION DES MODÈLES DE DONNÉES DE DEUX CENTRES DE CONDUITE .....	120
2.2	GÉNÉRALISATION.....	123
2.3	CONCLUSION .....	125
<b>3</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>125</b>
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 2</b> .....		<b>131</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....		<b>131</b>
<b>SYSTÈME DE NOTATIONS</b> .....		<b>135</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....		<b>136</b>
<b>ANNEXE 1 : LE FORMALISME GRAI</b> .....		<b>149</b>
<b>ANNEXE 2 : LA MÉTHODE DE LA PSEUDO INVERSE</b> .....		<b>155</b>
<b>ANNEXE 3 : CADRE DE DÉCISION POUR LA PLANIFICATION MULTI-NIVEAU</b> .....		<b>161</b>

---

---



**Introduction  
générale**

## Introduction Générale

La complexité des systèmes de production induite par la globalisation des marchés, les pré requis de flexibilité et de réactivité, ont donné naissance à des organisations réticulaires rendues possibles par le développement des technologies de communication et d'information. Le paradigme d'entreprise virtuelle, terme le plus souvent utilisé pour décrire la mise en réseau d'entreprises géographiquement dispersées, traduit la tendance des entreprises à former des alliances dans l'objectif de répondre aux opportunités émergentes du marché par complémentarité des compétences, des ressources, des technologies, des services.

La mise en œuvre effective d'une entreprise virtuelle n'est toutefois pas sans poser de problèmes. Ceux-ci sont, d'une part, relatifs à la coordination des différentes fonctions inter-entreprises et, d'autre part, renvoient à la structuration, à l'échange et au partage de bases de données, garants d'une performance globale et d'un avantage compétitif. La Gestion de Production, fonction qui concerne plus particulièrement notre travail, doit elle-même être étendue à l'échelle du réseau d'entreprises, posant ainsi le problème de la planification et de la répartition des tâches réalisant le carnet de commande entre des ressources internes supervisées et/ou des ressources externes accessibles par sous-traitance.

Les approches actuelles en planification intra-entreprise permettent de déterminer des plans de production, le plus souvent à capacité infinie des ressources, et nécessitent de ce fait un effort conséquent afin d'obtenir des ordonnancements faisables. Le problème d'ordonnement (programmation dans le temps de l'exécution des tâches sur les différentes ressources) est d'une grande complexité combinatoire et il n'existe pas d'algorithme universel de résolution. En outre, planification et ordonnancement étant le plus souvent définis en séquence, la cohérence des solutions est souvent difficile à garantir. A la suite d'un travail initialisé au laboratoire [Zolghadri, 1998], nous avons basé nos travaux sur un concept de *conduite généralisée* visant à mener conjointement et récursivement l'allocation des tâches au fur et à mesure de la désagrégation des plans et des données techniques afférentes (gammes, ressources). L'ordonnement est alors vu comme une fonction générique affinée récursivement au travers d'un processus de décision multi-niveau, chaque décision étant prise sur la base d'une vue agrégée du système à conduire.

Mais l'entreprise virtuelle n'est que la manifestation la plus intégrée d'organisations réticulaires de production. En fait, le paradigme de réseau est omniprésent, à différentes échelles de l'espace, dans l'univers de production : réseau d'entreprises, de sites de productions, d'ateliers, de cellules, de postes de travail, etc. Dans notre approche, chaque ressource virtuelle (c'est-à-dire une vue agrégée d'une organisation réticulaire plus fine) ou réelle (moyens concrets) est pilotée par un centre de décision. Notre contribution est une proposition d'un modèle générique du problème de conduite tel qu'il se pose à un centre de décision quel qu'il soit, intégrant les dimensions de partenariat et/ou de supervision. Notre objectif n'est pas de modéliser le processus-même de décision mais d'en formaliser algébriquement la problématique en délimitant le cadre de décision et en fournissant un jeu de règles de cohérence pour la vérification a posteriori des scénarios de décision.

Pour tout centre de décision, on initialise la fonction planification par la donnée d'un carnet de commande qui spécifie la nature et la quantité des produits à fabriquer sur l'horizon du plan.

Un premier problème consiste à déterminer les besoins en approvisionnements et la charge de travail requis pour satisfaire ce carnet de commande, tout en déployant une politique de gestion des stocks. Le recours

aux réseaux de Petri nous permet de modéliser les données techniques relatives aux produits et aux tâches de transformation, sans restriction sur la nature des tâches, et de raisonner sur les alternatives d'exécution du carnet de commande. La résolution de ce problème s'apparente à la détermination d'une 'commande' au sens de l'Automatique, qui se traduit ici par l'inversion d'un système linéaire non carré. Le raisonnement conduit à spécifier un plan de travail, optimal ou non optimal, réalisant le carnet de commande.

Un deuxième problème consiste ensuite à mettre en œuvre le plan sur une échelle plus fine du temps et de l'espace, c'est-à-dire à procéder à une allocation des tâches au sein d'un réseau de ressources internes ou externes obtenu par désagrégation de la ressource initialement considérée. Ce raisonnement est cadré par un jeu de règles intégrant conjointement les contraintes de capacité des lieux de transformation et les contraintes logistiques d'approvisionnement.

Cette thèse vise essentiellement à fournir un modèle quantitatif de données, générique, adapté à la structure réticulaire des organisations, compatible avec les contextes, souvent combinés, de coopération et/ou supervision, comme support au raisonnement des centres de décision. En outre, il nous a semblé impératif de rendre une telle structure de données à la fois répartie (chaque centre de décision possédant des données techniques locales) et multi-niveau pour limiter la complexité combinatoire des décisions en recourant aux données agrégées ad hoc.

Le manuscrit comporte deux parties.

La première partie vise à situer le contexte environnant notre travail. Le chapitre 1 rappelle la problématique moderne de production induite par le développement des organisations réticulaires. Le chapitre 2 porte plus précisément sur la conduite de ces systèmes, en rappelant les différentes approches de planification/ordonnancement.

La deuxième partie regroupe la contribution de la thèse. Le chapitre 3 commence par décrire l'architecture de conduite multi-niveau et multi-site qui constitue la toile de fond de nos développements. Le chapitre 4 est une formalisation algébrique du cadre de décision menant au calcul des besoins et des travaux, sans présomption des ressources. Le chapitre 5 prolonge ce raisonnement par la modélisation du problème d'allocation et de la logistique attenante. Enfin, le chapitre 6 présente deux mécanismes de récursivité applicables au modèle générique présenté dans les chapitres 4 et 5 :

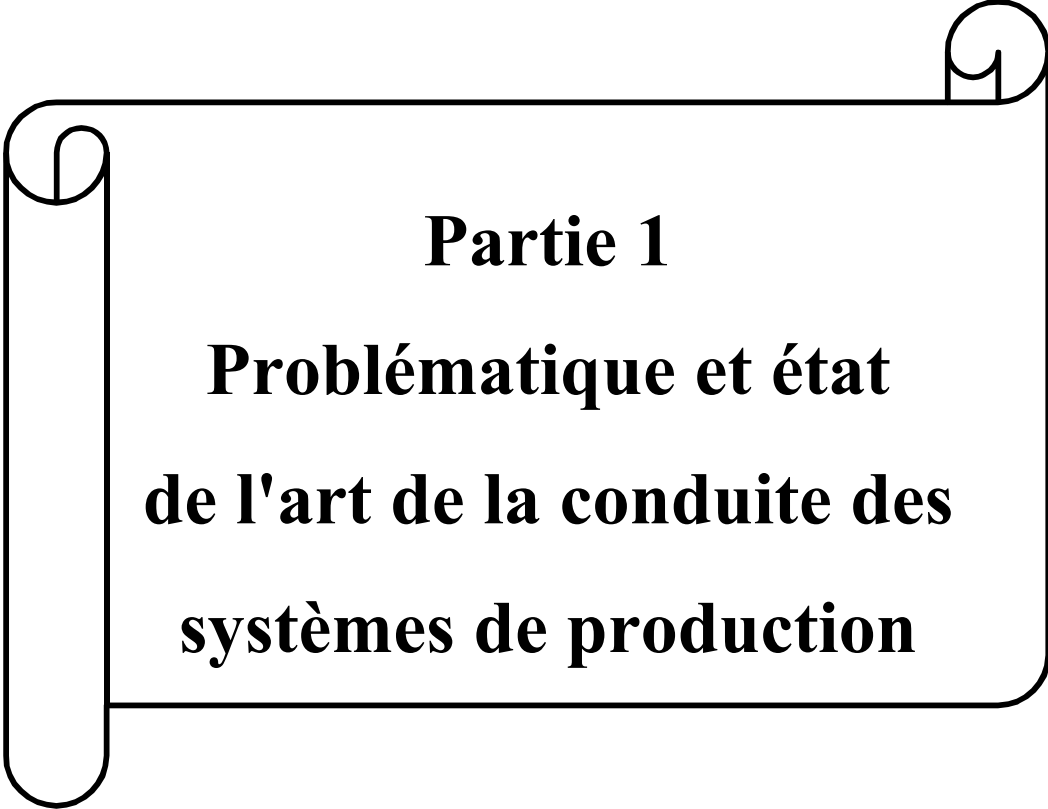
- le chaînage 'horizontal' des données techniques réparties dans les centres situés dans un lien client-fournisseur et la vérification de cohérence statique de la Supply Chain ;
- la désagrégation des données techniques d'un niveau à l'autre et la vérification de cohérence statique des données fines vis-à-vis des données agrégées.

Une conclusion générale tente d'identifier les problèmes théoriques non résolus, les difficultés d'application pratique de nos résultats, ainsi que les perspectives de développement prioritaires.

Un glossaire est présenté en fin de manuscrit. Les notations sont enrichies au fur et à mesure des développements : dans le chapitre 4, on raisonne sur une ressource implicite et sur un horizon temporel implicite. Dans le chapitre 5, les variables sont complétées de l'indication des ressources sujettes à allocation de travaux et du temps. Enfin, le chapitre 6 amène à considérer simultanément différents niveaux de conduite, ce qui amène encore à étendre les notations précédentes.

ooo

---



# **Partie 1**

## **Problématique et état de l'art de la conduite des systèmes de production**

### Résumé

L'évolution du contexte de production induite, par les impératifs de compétitivité des entreprises et favorisée par le développement des nouvelles technologies d'information et de communication a donné naissance à des organisations réticulaires c'est-à-dire structurées en réseau. Ces dernières, basées sur des relations étroites de partenariat entre acteurs de la chaîne logistique, nécessitent de définir de nouveaux outils de gestion permettant à un ensemble d'entités séparées d'opérer comme une entité unique. Outre le partage des différents plans de production et des données relatives aux stocks et ressources, un tel partenariat implique d'étendre le spectre des activités opérationnelles à toutes les fonctions de l'entreprise : le marketing, la conception de produit, la planification des approvisionnements et de la demande, la gestion de la production et de la logistique, la gestion de la communication, etc...

Après une rapide présentation des facteurs de succès actuellement prédominants pour les entreprises et des solutions industrielles disponibles, nous présentons un état de la recherche sur la problématique de la conduite des systèmes de production, mono et multi-site.



---

---

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION À LA PARTIE 1</b> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1 : LE CONTEXTE DE PRODUCTION ACTUEL</b> .....	<b>17</b>
<b>1 L'ÉVOLUTION DE L'APPAREIL PRODUCTIF</b> .....	<b>17</b>
1.1 1900 - 1960 : « PRODUIRE » (LES SOIXANTE GLORIEUSES) .....	17
1.2 1960 - 1980 : « PRODUIRE CE QUI SERA VENDU » .....	17
1.2.1 <i>Caractéristiques de production</i> .....	17
1.2.2 <i>Les stratégies mises en œuvre par les entreprises</i> .....	18
1.2.3 <i>L'offre en outils supports (GPAO)</i> .....	18
1.3 1980 - 1995 : « PRODUIRE CE QUI EST DÉJÀ VENDU » .....	18
1.3.1 <i>Les caractéristiques de production</i> .....	18
1.3.2 <i>Les stratégies mises en œuvre par les entreprises</i> .....	19
Les stratégies d'intégration .....	19
Les stratégies de coopération .....	19
La stratégie logistique .....	19
1.3.3 <i>Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)</i> .....	20
L'EDI .....	20
L'ECR .....	20
1.3.4 <i>L'évolution des outils supports</i> .....	21
Les progiciels de GPAO .....	21
Les outils supports à la décision .....	21
1.4 CONCLUSION .....	21
<b>2 L'APPAREIL PRODUCTIF MODERNE 1995 - ..... " Vendre et servir"</b> .....	<b>21</b>
2.1 LES CARACTÉRISTIQUES DE PRODUCTION .....	21
2.1.1 <i>Les réseaux d'entreprises</i> .....	22
2.1.2 <i>Typologie des réseaux</i> .....	22
2.1.3 <i>La problématique des organisations réticulaires</i> .....	22
2.2 LES STRATÉGIES D'ENTREPRISES .....	23
2.2.1 <i>La spécialisation</i> .....	23
2.2.2 <i>Les stratégies logistiques</i> .....	23
2.3 LES RÉSEAUX INFORMATIQUES SUPPORTS AUX RÉSEAUX DE PRODUCTION .....	23
2.3.1 <i>Le réseau Internet</i> .....	23
2.3.2 <i>Le réseau Intranet</i> .....	24
2.3.3 <i>Le réseau Extranet</i> .....	24
2.3.4 <i>La place de l'EDI dans Internet</i> .....	24
2.4 L'OFFRE EN OUTILS DE GESTION .....	24
2.4.1 <i>Les progiciels de Gestion Industrielle Intégrée (GII)</i> .....	25
2.4.2 <i>Les progiciels de type Supply Chain Management (SCM)</i> .....	25
Les SCP .....	25
Les SCE .....	26
2.4.3 <i>ERP versus SCM</i> .....	26
2.4.4 <i>Les sous-segments de la SCM</i> .....	27
2.4.5 <i>Les sous-segments de la gestion des informations</i> .....	27
2.4.6 <i>Le devenir des outils de gestion</i> .....	27
<b>3 CONCLUSION</b> .....	<b>27</b>
<b>CHAPITRE 2 : LA CONDUITE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION</b> .....	<b>29</b>
<b>1 LA GESTION DE PRODUCTION</b> .....	<b>29</b>
1.1 DÉCOMPOSITION DU SYSTÈME DE GESTION DE PRODUCTION .....	29
1.1.1 <i>Décomposition fonctionnelle</i> .....	29
1.1.2 <i>Décomposition temporelle</i> .....	30

1.2	LA FONCTION PLANIFICATION.....	31
<b>2</b>	<b>LES APPROCHES DE PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION .....</b>	<b>32</b>
2.1	LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION .....	32
2.1.1	L'approche MRP.....	32
	Apports du système MRPII.....	33
	Les solveurs de planification de type APS.....	33
2.1.2	L'approche hiérarchisée.....	34
	L'approche Hax et Meal .....	35
	L'approche Axsäter .....	35
	L'approche Mercé - Hétreux .....	35
	Conclusion.....	36
2.1.3	L'approche OPT.....	36
2.2	L'ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION .....	37
2.2.1	La classification proposée par le Gotha.....	37
2.2.2	La classification proposée par Cardeira.....	37
2.2.3	La classification proposée par Nagar.....	38
2.3	LES APPROCHES INTÉGRÉES DE PLANIFICATION/ORDONNANCEMENT .....	38
2.3.1	L'approche Fontan et Imbert.....	38
2.3.2	L'approche Lasserre, Dauzere-Peres et Roux .....	38
2.3.3	L'approche Gershwin .....	39
2.4	CONCLUSION.....	39
<b>3</b>	<b>LES APPROCHES MULTI-SITE .....</b>	<b>40</b>
3.1	LA PLANIFICATION MULTI-SITE.....	40
3.1.1	Définition.....	40
3.1.2	Les principales approches.....	41
	L'approche Le Page [Le Page, 1993].....	41
	L'approche Thierry [Thierry, 1994].....	42
	L'approche Rota [Rota, 1998].....	42
	L'approche Archimède .....	43
	L'approche Guinet .....	43
	L'approche Roux .....	43
3.1.3	Conclusion.....	45
3.2	LES ARCHITECTURES DE RÉFÉRENCES.....	45
3.2.1	Le modèle NIIP.....	45
	Objectifs .....	45
	Résultats .....	46
3.2.2	Le modèle PRODNET.....	46
	Le module interne .....	46
	Le module de coopération PRODNET (Prodnnet Cooperation Layer) .....	46
	Résultats .....	47
3.2.3	Le modèle MASSYVE.....	47
	Le système multi-agent HOLOS.....	47
	Le système de gestion des informations PEER .....	47
	Le projet MASSYVE .....	48
3.2.4	Conclusion.....	48
3.3	LES SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION DE PRODUCTION.....	49
3.3.1	Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD).....	49
3.3.2	L'aide à la décision en production.....	50
3.4	CONCLUSION.....	51
	<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 1 .....</b>	<b>53</b>



## Introduction à la partie 1

Les évolutions des structures organisationnelles, de l'environnement socio-économique de l'entreprise, des technologies de l'information et de la communication ont induit de profondes mutations dans la façon dont les systèmes de production sont gérés.

Le premier chapitre de cette partie est dédié à l'analyse de l'environnement de production moderne. Après avoir rappelé l'historique ayant mené au contexte moderne de production, nous présentons les stratégies de conduite mises en œuvre par les entreprises ainsi que les outils informatiques supports à la production et leurs limites face au problème de la planification.

Le deuxième chapitre est donc, dans un premier temps, consacré à l'étude de la fonction clé de la gestion de production qu'est la planification au sens large (planification et ordonnancement de la production), mono-site. Nous verrons qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode permettant de garantir la faisabilité de l'ordonnancement résultant du calcul d'un plan de production. Toutefois, il se dégage de cette analyse un certain nombre d'éléments qui nous semblent indispensables à la résolution du problème de gestion de production moderne. Parallèlement, les organisations productives nouvelles élargissent les frontières traditionnelles de l'entreprise, visant une meilleure synergie entre donneurs d'ordres, fournisseurs, sous-traitants et clients au sein d'une *entreprise étendue*. La gestion de production traditionnelle, c'est-à-dire intra-entreprise, doit donc céder le pas à une gestion de production capable de coordonner l'exploitation d'un outil de production multi-site. Le système global de pilotage qui en résulte est plus complexe car la distribution de la décision entre plusieurs entités autonomes appelle la définition d'objectifs locaux globalement cohérents. D'autre part, le bon fonctionnement du système distribué de production est conditionné par la résolution des problèmes de coordination et/ou de coopération entre les différents acteurs, ce qui suppose l'existence d'un système d'information adapté.

Dans un second temps, le chapitre deux s'attache donc à dresser un état de l'art des architectures et des structures décisionnelles pour la production multi-site et à positionner une problématique *d'aide à la décision* telle qu'elle se présente dans ce contexte.



# Chapitre 1

## Le contexte de production actuel

Les nécessaires reconstructions économiques des pays industrialisés à l'issue des deux guerres mondiales, et plus récemment le développement des technologies de communication et d'information, ont induit de profondes modifications comportementales des systèmes de production et des marchés. **"Il apparaît aujourd'hui que l'entreprise industrielle performante nécessite un effort permanent d'adaptation de l'outil de production, de la structure des organisations et corrélativement des outils de gestion correspondants"** [Barraux, 1997].

Les modifications de l'environnement manufacturier peuvent être abordées selon trois aspects : l'organisation de la production, les stratégies mises en œuvre par les entreprises, les outils informatiques supports à la communication et à la gestion des partenariats de firmes. Nous constaterons que les enjeux de production du 21<sup>ème</sup> siècle n'ont pas fondamentalement remis en cause les anciens modèles de gestion (planification, gestion des stocks) mais appellent une meilleure agilité des organisations productives dans un marché instable.

### 1 L'EVOLUTION DE L'APPAREIL PRODUCTIF

#### 1.1 1900 - 1960 : « produire » (les soixante glorieuses)

Les nations industrielles sont dans une phase de croissance. Tout ce qui est produit est stocké puis vendu. Les produits sont peu diversifiés, les séries sont importantes. Taylor propose dès 1900 une organisation scientifique du travail fondée sur :

- la division et le contrôle du travail,
- la sélection des ouvriers et leur formation à une tâche spécifique,
- le partage des responsabilités entre dirigeants et exécutants [Taylor, 1911].

La structure organisationnelle résultante est exclusivement hiérarchique.

L'organisation des systèmes de production est balbutiante et ne procède pas encore d'une dimension stratégique d'entreprise et/ou de production. De même, l'informatique qui n'en est qu'à ses prémises n'a pas encore d'application en production.

#### 1.2 1960 - 1980 : « produire ce qui sera vendu »

##### 1.2.1 Caractéristiques de production

Le développement des technologies industrielles (automates, robots, ...) permet, par l'automatisation des processus productifs, d'améliorer la productivité des entreprises confrontées aux faibles coûts de main d'œuvre des pays en cours de développement. Les ouvriers possèdent dorénavant un savoir-faire et des compétences techniques et doivent collaborer. L'idée de coopération entre les différents personnels de l'entreprise à des fins de rentabilité émerge, la définition d'objectifs globaux s'impose.

On constate malgré cela que les décisions et le traitement de l'information sont toujours centralisés, le contrôle hiérarchique encore strict.

Parallèlement, la performance de la production en petites et moyennes séries repose sur la capacité d'adaptation et de réaction des entreprises aux exigences des consommateurs en termes de coût, qualité, diversification et innovation de l'offre.

### 1.2.2 Les stratégies mises en œuvre par les entreprises

Au niveau stratégique, le marketing des produits (outil de base de la différenciation de l'offre) devient d'un intérêt aussi grand que la maîtrise des coûts de production. Les principes de base de l'organisation scientifique du travail élaborés par Taylor devenus obsolètes, les manufacturiers japonais et notamment Toyota développent le "*Toyotisme*", c'est-à-dire les concepts de "**juste à temps (JAT)**" et de "**flux tendu**". Ce mode de production cherche à lutter contre les stocks inutiles en produisant au plus juste [Tarondeau, 1993].

#### **Le Juste à Temps et le flux tendu en tant que stratégie de production**

Le juste à temps (JAT) vise à diminuer les délais d'approvisionnement et les stocks de matières premières. Sa mise en œuvre va fréquemment de pair avec la volonté de réduire les stocks d'en-cours (fonctionnement en flux tendus), qui se fonde sur la recherche permanente des sources de dysfonctionnement (lean production [Loupil, 1998]).

Au niveau de la planification, la réduction des délais d'approvisionnement permet :

- de s'affranchir des contraintes d'approvisionnement et, ce faisant, de faciliter le passage de la prévision des ventes à la planification,
- d'améliorer la réactivité des plans de production vis-à-vis des aléas court terme.

En contrepartie, elle augmente la sensibilité des firmes vis-à-vis des retards d'approvisionnement.

La mise en œuvre d'un "juste à temps" requiert donc la création de partenariats stratégiques avec des fournisseurs, afin de diminuer les risques de rupture d'approvisionnement.

#### **L'internationalisation des marchés et la diversification des produits en tant que stratégies de croissance**

Durant les années 70, l'essor des technologies d'information et de communication permet à des entreprises géographiquement dispersées d'échanger des données de conception et/ou de production pour atteindre des marchés de classe mondiale.

L'internationalisation procède de diverses modalités que l'on peut regrouper en deux types : l'exportation et l'implantation [Cocula, 1999]. Une telle politique de croissance s'inscrit généralement dans un schéma stratégique plus global de diversification des produits [Ansoff, 1965], [Ramanantsoa, 1997].

Toutefois, les stratégies de coopération induites par le juste à temps, qui conduisent les firmes à s'allier à leurs fournisseurs, ne sont pas encore vulgarisées et restent l'apanage des grands comptes.

### 1.2.3 L'offre en outils supports (GPAO)

Dans les années 70-80, les principaux outils informatiques **qui facilitent les activités liées à la gestion de la production** sont désignés sous le vocable d'outils GPAO. A l'image de l'organisation de l'entreprise, ceux-ci sont rigides, peu réactifs aux fluctuations de la demande et consistent en un ensemble cloisonné d'applications logicielles et fichiers spécifiques. Commercialisés sous la forme de produits logiciels mono concept (dédiés à une fonction de gestion de production) ou de développements spécifiques, les outils GPAO ne sont dans la plupart des cas que des bases de données statiques de gestion de production dépourvues de fonctionnalités intelligentes de gestion de production.

## **1.3 1980 - 1995 : « produire ce qui est déjà vendu »**

### 1.3.1 Les caractéristiques de production

La production contrariée par la saturation croissante des marchés et le durcissement de la concurrence rendent cruciale la capacité de s'adapter au marché, d'être innovant et flexible. Les impératifs de réactivité et flexibilité trouvent une réponse dans la décentralisation des installations et de la décision, la



coopération inter entreprise, et l'interactivité des différents acteurs. La rationalité économique oblige l'entreprise à se tourner résolument vers ses clients, et à se concentrer sur ses activités à forte valeur ajoutée.

Selon Porter [Porter, 1986] chaque activité accomplie pour concevoir, fabriquer, commercialiser, distribuer et soutenir un produit peut influencer sur la position d'une firme en termes de coûts, et créer un facteur de compétitivité. La réduction des coûts passant par l'intégration des activités en processus, la répartition des rôles au sein de l'entreprise s'en trouve bouleversée.

### 1.3.2 Les stratégies mises en œuvre par les entreprises

Durant cette période, les stratégies de coopération et d'intégration sont les leitmotivs des entreprises désireuses d'accroître leur productivité.

#### Les stratégies d'intégration

Dans le but de maîtriser à la fois leurs approvisionnements et leurs débouchés, les donneurs d'ordres sont amenés à annexer leurs fournisseurs (intégration amont) et/ou leurs clients (intégration aval). Ainsi, du fait des liens entre la chaîne de valeur interne d'une firme et celle de ses clients, fournisseurs, et distributeurs, l'intégration joue un rôle fondamental pour la croissance des entreprises, en permettant en outre d'internaliser des transactions commerciales et de mieux maîtriser la qualité.

#### Les stratégies de coopération

La coopération d'entreprise se définit comme une action collective menée par l'ensemble des acteurs vers un but commun. Il existe plusieurs formes de coopération, fonction du degré de dépendance entre les partenaires. Dans ce cadre, on trouve les impartitions, les franchises, les groupements d'intérêts économiques, les accords, les joint ventures, les prises de partitions croisées, les syndicats, etc. [Cocula, 1999], [Descottes-Genon, 1997]. Bien qu'il existe des différences entre ces types de coopération (d'un point de vue légal, juridique ou comportemental), les entreprises engagées forment des réseaux de partenaires. C'est l'ère de la coopération entre partenaires de la chaîne logistique qui émerge tous azimuts [Brenot, 1996].

#### La stratégie logistique

Le coût logistique d'un produit représentant une partie substantielle du prix de vente aux consommateurs, beaucoup de distributeurs et d'entreprises ont compris l'intérêt de mettre en œuvre une **stratégie logistique intégrée**.

Lee [Lee, 1993] définit la logistique comme "un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client"

La gestion de la chaîne logistique, qui va du fournisseur du fournisseur au client du client, est organisée en processus clés : prévoir, approvisionner, produire, stocker et livrer<sup>1</sup> (Figure 1.1). Ceci suppose une coordination étroite des différentes ressources de l'entreprise afin de proposer au client un service d'excellence au meilleur prix, et dans les meilleurs délais. Une logistique intégrée se fonde sur la gestion explicite des flux matériels et informationnels afférents, tant internes qu'externes, tant amont qu'aval.

La mission de la chaîne logistique est de réaliser la rencontre entre l'offre de l'entreprise et l'offre du marché, tout en recherchant systématiquement les conditions d'optimalité dans l'exécution. "Sa mise en œuvre procédant des différents acteurs, elle est appelée à gérer en ce sens les tensions existantes à leurs interfaces du fait de la non identité de leurs objectifs propres." [Tixier, 1981].

---

<sup>1</sup> Tixier parle de gestion du processus logistique.

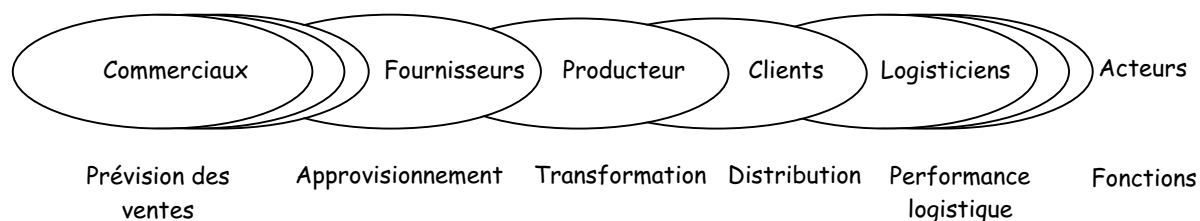


Figure 1.1 : Fonctions et acteurs d'une chaîne logistique

Les technologies de l'information et de la communication sont le vecteur du déploiement de la logistique intégrée au sein d'un système productif toyotiste. Elles ont permis, dans un premier temps, le découplage des organisations et leur mutation vers des organisations coopérantes et, dans un second temps, la mise en œuvre des stratégies de coopération et d'intégration précédemment citées.

### 1.3.3 Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

Les TIC constituent un ensemble de moyens de stockage, de traitement et de distribution de l'information permettant :

- de réinventer la relation avec le client en assurant une meilleure connaissance de son profil de consommation et de ses attentes dans le but de personnaliser le produit,
- de relier en temps réel les différents services de l'entreprise, et de ce fait d'atténuer les contraintes spatiales et temporelles d'exécution des processus [Bakos, 1997] (par exemple, la coopération à distance d'équipes de R&D permet de réduire la durée de développement de nouveaux produits).

Un partenariat de conception et de développement simultané peut ainsi s'instaurer entre une entreprise, ses clients, ses fournisseurs et/ou ses sous-traitants, via un échange de données informatisé. A ce titre, les EDI (Electronic Data Interchange ou échange de données électronique) constituent l'outil clé pour l'interconnexion des différents partenaires.

#### L'EDI

L'association Edifrance<sup>2</sup> définit le principe de l'EDI comme **"un échange informatisé de données structurées d'ordinateur à ordinateur (ou d'application à application) selon des messages préétablis et normalisés via un mode de communication électronique"**.

Indispensable à la mise en œuvre de structures coopératives, le champ d'application de l'EDI est très important et s'est développé autour de normes propriétaires, chaque secteur définissant un langage qui lui est propre pour constituer un système de communication homogène, et s'adapter aux besoins spécifiques de chaque domaine d'activité. En matière de gestion de la production et de la distribution, l'EDI assure l'interconnexion entre fournisseurs et distributeurs et améliore la traçabilité des produits. Il permet, de plus, de mettre en œuvre une réponse optimale au client (ECR : Efficient Consumer Response).

#### L'ECR

L'ECR (Efficient Consumer Response) ou **"Efficacité et Réactivité au service du Consommateur"**, est une stratégie à l'usage de l'industrie et du commerce dans laquelle fournisseurs et distributeurs travaillent ensemble pour apporter une meilleure satisfaction au consommateur final, et réduire les coûts (impératifs de productivité). Les deux piliers de ce système sont un échange d'informations de qualité s'appuyant sur le principe du zéro papier, et un flux de marchandises sans rupture. La démarche ECR peut être résumée par les mots-clé suivants : intégration, collaboration fournisseurs/distributeurs, travail en équipes, visibilité globale, analyse charges/capacités, utilisation conjointe d'outils EDI, DRP<sup>3</sup> ou MRP<sup>4</sup> et prévisions.

<sup>2</sup> Créée en janvier 1990, l'association Edifrance a pour mission de promouvoir la démarche EDI et d'illustrer sa contribution fondamentale à la compétitivité des entreprises. De plus amples informations sur cette association sont disponibles sur le site <http://www.edifrance.org/>

<sup>3</sup> Le DRP constitue "une approche logicielle qui a pour objet d'assurer la planification et l'ordonnement des besoins en transports et en ressources et qui s'appuie sur des simulations de scénarios prenant en compte les différentes caractéristiques du réseau (par exemple les commandes, les unités de stockage) et la relation charges-capacités (analogie avec le MRP en production)" [Martin, 1997].

<sup>4</sup> Material Requirement Planning (Voir chapitre 2 (§ 2.1.1))

### 1.3.4 L'évolution des outils supports

#### Les progiciels de GPAO

L'implémentation des principes de gestion logistique intégrée évoqués précédemment nécessite de puissants outils logiciels à même de supporter l'intégration des fonctions de l'entreprise et des données (techniques, commerciales, etc.) qui s'y rattachent.

L'offre GPAO tente donc de s'ouvrir aux autres fonctions de l'entreprises selon deux variantes :

- les progiciels mono concepts s'enrichissent au fil des ans de nouvelles fonctionnalités, liant la gestion de production à la gestion de projet, en passant par l'ordonnancement et le suivi de production.
- les développements spécifiques développés en interne ou par des prestataires externes à partir d'un cahier des charges évoluent selon deux orientations : une orientation **métier** où les concepteurs font valoir leurs compétences par rapport à un domaine d'activité ciblé ; une orientation **fonction** pour les logiciels qui se concentrent sur une fonction déterminée (ordonnancement à capacité finie, gestion de projet, suivi de production).

#### Les outils supports à la décision

Parallèlement, les systèmes informatiques progressent en ergonomie. L'arrivée des terminaux écrans permettant de consulter des bases de données, l'augmentation de la puissance des machines favorisant l'apparition d'interfaces hommes/machines modernes vont accroître la surface de communication entre l'ordinateur et l'utilisateur. Les premiers systèmes d'aide à la décision qui procurent aux décideurs un grand nombre de données ainsi que des outils d'analyse et de calcul à la carte sont nés.

### 1.4 Conclusion

L'histoire industrielle montre que chaque époque traduit de nouveaux impératifs de production eut égard à l'évolution du comportement des marchés, au déploiement et à la vulgarisation des technologies de l'information et de la communication (tableau 1.1). Les modèles de production en flux poussés (modèles Tayloristes) et flux tirés (modèle Ohniste) présentent chacun des déficiences. Au terme de la période 80-95, un compromis reste donc à trouver entre ces deux modèles qui, loin d'être exclusifs, peuvent cohabiter au sein d'un même système productif selon le type de production, le délai de réapprovisionnement en composants critiques, la nature des relations avec les clients et les fournisseurs, etc.

Epoque	Système productif	Caractéristiques essentielles	Objectifs de production	Stratégies mises en œuvre	Outils informatiques
1900/1960	Production de Masse	Demande forte Standardisation Taylorisme	Quantité Coûts	Division du travail Stocks	
1960/1980	Production flexible	Internationalisation des marchés Forte concurrence	Qualité Délais Flexibilité	Juste à temps Internationalisation Diversification	GPAO
1980/1995	Production quasi personnalisée	Marchés saturés et étroits Demande variable	Innovation Réactivité Fiabilité	Coopération Intégration Logistique	GPAO EDI

Tableau 1.1 : Les évolutions des systèmes de production au 20<sup>e</sup> siècle

## 2 L'APPAREIL PRODUCTIF MODERNE 1995 - ..... " Vendre et servir"

### 2.1 Les caractéristiques de production

Dans un contexte de mutations technologiques et de mondialisation des marchés, l'entreprise est devant la nécessité de recentrer ses activités sur ses compétences propres et de développer une stratégie de coopération et de recherche de nouvelles alliances. L'intensification des relations entre firmes accentue le

développement des organisations réticulaires, sur la base d'une forte intégration des processus de gestion des flux physiques et d'informations, donc de la logistique.

### 2.1.1 Les réseaux d'entreprises

Les Entreprises Virtuelles ou Entreprises Etendues sont les organisations réticulaires les plus emblématiques.

Le paradigme d'Entreprise Virtuelle permet à des entités indépendantes et éventuellement géographiquement dispersées de coopérer dans le but de partager des savoir-faire, des compétences, des ressources, des coûts (de production et de gestion), des profits ou des risques [Jagdev, 1998], [Childe, 1998]. Les firmes participantes se focalisent sur leurs compétences et sous-traitent<sup>5</sup> les activités qu'elles ne maîtrisent pas, afin de répondre collectivement à une opportunité du marché, à laquelle elles n'auraient pu répondre individuellement [Zhao, 1999].

L'entreprise virtuelle est donc une entreprise résultant de la mise en réseau d'acteurs industriels dispersés. Le concept d'Entreprise Etendue (EE) est similaire, à ceci près que l'on considère le partenariat sous-jacent comme étant une alliance pérenne des différents acteurs, en quelque sorte structurelle, contrairement au cas de l'Entreprise Virtuelle (EV) davantage fondée sur une alliance contextuelle à durée limitée [Davidow, 1997]. L'EV est une organisation répondant au besoin accru de réactivité face aux fluctuations du marché, propriété que l'on s'accorde aujourd'hui à qualifier d'**agilité**<sup>6</sup>.

De l'intérieur, une EE/EV semble dépourvue de contour et dotée d'interfaces perméables, sujettes à évolution constante. De l'extérieur, elle apparaît comme une entité *virtuelle* unique responsable du cycle de vie entier du produit : de l'approvisionnement et gestion logistique des matières premières, au recyclage et la destruction des produits en fin de vie, en passant par la conception, la fabrication, la distribution des produits et le service clientèle.

### 2.1.2 Typologie des réseaux

Nous avons vu au paragraphe 1.3.2 qu'il existe une multiplicité de formes de coopération. Ainsi les réseaux qui sous-tendent la coopération peuvent être partitionnés en trois groupes [Cocula, 1999] :

- les réseaux d'entreprises co-traitantes (conséquence du recentrage des grandes entreprises sur leur métier),
- les réseaux de firmes coopératives (entente entre entreprises de même taille en vue de rechercher de nouvelles opportunités de production ou de marché),
- les réseaux d'accès à l'innovation (réseaux technico-économiques d'entreprises de biens et de services disposant de compétences propres afin d'accélérer la recherche et le développement de nouveaux produits et de nouvelles façons de travailler).

### 2.1.3 La problématique des organisations réticulaires

Plusieurs facteurs conditionnent l'émergence et la viabilité d'un réseau d'entreprises agiles [Gunasekaran, 1999], [Frankwick, 1995] :

- les caractéristiques du marché et les objectifs de production,
- les décisions de sous-traitance basées sur des critères de performance (financiers ou non),
- la sélection des partenaires et l'identification de leurs compétences clés,
- la gestion de la qualité,
- la gestion des ressources humaines,
- la gestion de la logistique.

La mise en œuvre effective des réseaux d'entreprises nécessite donc de développer de nouvelles méthodes et stratégies de gestion.

---

<sup>5</sup> La sous-traitance ou outsourcing favorise les capacités de compétition des fabricants et des fournisseurs et améliore à la fois leur synergie afin de parvenir à un succès commun. Cette forme de collaboration établit des liens mutuellement bénéfiques et formels en termes de coordination dans la conception, le développement et les coûts entre des entreprises manufacturières juridiquement indépendantes et commercialement coopérantes.

<sup>6</sup> Une entreprise agile est définie comme une compagnie capable de reconfigurer rapidement ses ressources et méthodes afin de mieux répondre aux opportunités du marché.

## 2.2 Les stratégies d'entreprises

Les deux stratégies actuellement prédominantes sont la spécialisation et la globalisation.

### 2.2.1 La spécialisation

La stratégie de spécialisation reprend le pas sur la stratégie de diversification. Elle consiste pour les compagnies à se retrancher sur leurs véritables compétences et à développer des relations pérennes avec d'autres firmes spécialistes aussi bien pour la conception, le développement, l'approvisionnement et la commercialisation de produits et sous-ensembles [Gornev, 1997]. On assiste donc au recentrage de l'entreprise sur ses savoir-faire les plus compétitifs (core business), tout en contribuant, par le partenariat, à diversifier l'offre qui reste un pré-requis du marché.

**En d'autres termes, les organisations réticulaires rendent compatibles la diversification de l'offre et la spécialisation des activités des acteurs.**

### 2.2.2 Les stratégies logistiques

En termes d'organisation, les réseaux d'entreprises font évoluer la logistique intégrée ("entreprise maillée"), vers une logistique globale ("logistique relationnelle"). La chaîne logistique couvrant les flux de matières, d'informations et de capitaux est étendue aux partenaires extérieurs, afin de gagner plus de temps, de valeur, de compétence et de parts de marché. Le rôle des gestionnaires s'étend de la même façon. Ces derniers sont dorénavant confrontés à l'impératif d'optimiser la chaîne logistique globale. Cette optimisation passe par la redéfinition du rôle de la fonction achat dans l'entreprise et par une planification coordonnée des activités des différents maillons de la chaîne logistique, en se calant sur la demande des clients.

En particulier, la fonction achat, qui consistait à identifier des fournisseurs compétitifs, à négocier des bas prix et à suivre les approvisionnements, doit muer vers un rôle de gestion de ressources externes. Ceci de façon à assurer l'implication précoce des fournisseurs dans le développement et la conception de nouveaux produits, tout en restant proche des relations clients/fournisseurs traditionnelles en termes de partage des coûts et des informations techniques.

L'évolution des TIC, parallèlement au développement des modes de production en flux tiré, confère à ces nouvelles technologies une dimension stratégique dès lors qu'elles permettent d'assurer l'optimalité de la gestion globale du processus productif et de la logistique associée. En permettant la gestion globale des flux logistiques, les TIC incitent à la reconfiguration de l'organisation afin de privilégier une structure moins pyramidale et fondée sur une quasi-intégration électronique des transactions.

## 2.3 Les réseaux informatiques supports aux réseaux de production

Le déploiement de la production réticulaire s'accompagne d'une restructuration du système d'information interne à l'entreprise et de l'interconnexion des entreprises. Ainsi, dès les années 90, l'entreprise industrielle s'inscrit dans des réseaux d'informations intelligents qui lui permettent de s'adapter dans les meilleurs délais à son environnement. Les réseaux de communication Internet et ses déclinaisons Intranet et Extranet s'imposent comme les supports des changements environnementaux, des nouvelles méthodes de travail et des relations clients/fournisseurs.

### 2.3.1 Le réseau Internet

Acronyme de "International network", Internet est "un réseau mondial constitué d'un ensemble d'équipements informatiques hétérogènes qui utilisent le même protocole de communication (TCP/IP) et fonctionnent comme un réseau virtuel unique et coopératif"<sup>7</sup>.

Le réseau Internet, ou réseau des réseaux, est une architecture de réseaux de télécommunications offrant diverses possibilités. Il est devenu le vecteur idéal du commerce électronique permettant de constituer un

---

<sup>7</sup>www.edifrance.org

marché économique électronique<sup>8</sup>, en passe de constituer un vecteur de coopération industrielle et d'intégration logistique.

Les principaux avantages de l'Internet résident dans :

- sa pérennité, sa rapidité,
- la représentation universelle de l'information (web),
- des coûts d'installation moindres que ceux induits par l'implantation d'une solution EDI classique et des faibles coûts d'accès au réseau,
- la possibilité de configurer des sous-réseaux afin d'organiser des sous-systèmes de communication privatifs (Intranet et Extranet).

### 2.3.2 Le réseau Intranet

Le réseau Intranet doit être considéré comme "**l'application de la technologie Internet au réseau interne de l'entreprise**. Ses domaines d'application privilégiés sont la messagerie électronique, la documentation commerciale et institutionnelle sur l'entreprise, l'accès à des bases de données de l'entreprise, l'aide à la décision, le groupware<sup>9</sup>" [Comvopoulos, 1998].

### 2.3.3 Le réseau Extranet

Le réseau Extranet est une extension des applications développées sous Internet pour un usage privatif, exclusivement réservé aux partenaires et fournisseurs d'une entreprise.

Grâce à ce réseau, l'entreprise peut développer des relations étroites et privilégiées avec ses clients, fournisseurs, donneurs d'ordres et sous-traitants, en leur donnant accès à des bases de données communes, mais aussi développer des applications propres.

### 2.3.4 La place de l'EDI dans Internet

Internet fait référence au contenant et l'EDI au contenu. Bien que la messagerie électronique puisse être utilisée pour l'échange de données dans le réseau Internet, son utilisation est limitée par le manque de fiabilité et de sécurité des données échangées. Plusieurs facteurs influent donc en faveur de l'intégration des deux technologies Internet et EDI sous la forme d'un "Web-EDI" [Cappelli, 1999] pour répondre aux besoins d'intégration des partenaires. Notons qu'une autre alternative (le XML<sup>10</sup>) est actuellement en cours de déploiement pour l'échange structuré de documents sur Internet, et ce malgré les réticences des utilisateurs d'Internet.

## 2.4 L'offre en outils de gestion

Les évolutions techniques et le besoin d'intégration des différentes applications ont permis aux progiciels de "gestion de production classique" de s'enrichir de nouvelles fonctionnalités et par là même de s'élever au rang de progiciel de Gestion Industrielle (GI) ou de Gestion Industrielle Intégrée (GII ou ERP : Entreprise Resource Planning).

Par ailleurs, plusieurs familles de progiciels concourent à la mise en œuvre de la gestion de la chaîne logistique (SCM), parmi lesquels les APS (Advanced Planning System), les SCE (Supply Chain Execution) et une nébuleuse de progiciels au périmètre fonctionnel plus restreint, supports aux fonctions de la logistique proprement dite ou supports au système d'information.

La liste des outils présentés ici n'est pas exhaustive dans la mesure où, compte tenu de la rapidité d'évolution du contexte industriel et parallèlement du développement des TIC, le nombre des solutions logicielles est en perpétuelle augmentation et les recouvrements entre ces solutions de plus en plus nombreux. Nous présentons les principaux outils et leurs spécificités relativement au contexte de production précédemment présenté<sup>11</sup>.

---

<sup>8</sup> Place de marché pour les professionnels sites marchands pour les particuliers,

<sup>9</sup> Le groupware représente l'ensemble des techniques et des méthodes informatiques ou de télécommunications destinées au travail de groupe à distance

<sup>10</sup> format de description des données fondé sur le langage HTML

<sup>11</sup> dossier spécial Gestion et Organisation de l'Usine Nouvelle [Usine nouvelle, 2000], dossiers "Supply Chain Management" et "Entreprise Ressource Planning" du magazine CXP informatique [CXPa, 1999], [CXPb, 1999].

#### 2.4.1 Les progiciels de Gestion Industrielle Intégrée (GII)

Le principal objectif des GII (ERP en Anglais) est de rendre les entreprises plus performantes en améliorant leur gestion interne, en fiabilisant l'information et en assurant une plus grande cohérence entre les fonctions. Ces progiciels couvrent différentes fonctions de gestion (comptable, commerciale, production, achats, prévision des ventes, gestion des stocks, des transports, des ressources humaines, etc.) et échangent des informations entre ces modules via une base de données unique.

D'un point de vue fonctionnel, la majorité des ERP présentent des limites (notamment en termes de réactivité) du fait de l'outil de planification utilisé. En effet, la plupart d'entre eux sont basés sur une philosophie MRP monolithique, peu adaptée à la gestion des EE/EV.

D'autre part, certaines fonctions corollaires comme la gestion des stocks de sécurité, le cross docking<sup>12</sup> ou la pré-facturation de transport ne sont toujours pas bien couvertes par les ERP. Enfin, la communication avec les partenaires de la chaîne n'est pas toujours bien intégrée.

Les premiers éditeurs d'ERP mondiaux sont actuellement *SAP, ORACLE, BAAN, SSA PEOPLE SOFT, et JD EDWARDS*.

#### 2.4.2 Les progiciels de type Supply Chain Management (SCM)

Les fonctionnalités des progiciels SCM [Renouard, 2000] présents sur le marché concernent la planification de la demande, la gestion des ressources, la prévision de la demande et des ventes, la planification des stocks, la planification des fabrications et l'ordonnancement, la planification de la distribution et la communication par portail web.

A l'instar de la gestion de production, la gestion de la chaîne logistique peut, selon l'horizon temporel considéré, être déclinée en une planification logistique (SCP, Supply Chain Planning) aux niveaux stratégique et tactique et en une exécution logistique (SCE, Supply Chain Execution) au niveau opérationnel. Les traitements dans le premier cas se font en "Back office" (sans relations interactives avec les fournisseurs ou les clients), à l'inverse du second cas qui opère en "front office" (en considérant les contraintes liées à la présence de tiers : fournisseurs, donneurs d'ordres, sous-traitants, clients).

A l'heure actuelle, on recense plus d'une cinquantaine d'éditeurs de progiciels SCM sur le marché<sup>13</sup>, dominé par deux leaders : *I2 TECHNOLOGIES, MANUGISTICS*.

#### Les SCP

L'offre en SCP (Supply Chain planning) est couverte par des éditeurs spécialistes ou généralistes, "novices" ou issus de l'école de pensée ERP. Tous ces produits disposent des fonctionnalités de base des SCM, certains offrant en plus des outils pour concevoir et définir le réseau logistique que voudra déployer l'entreprise. Le noyau des SCP est l'APS (Advanced Planning and Scheduling ou Advanced Planning System). Les APS sont des progiciels capables d'optimiser la planification et de synchroniser les flux de la chaîne logistique, en tenant compte simultanément d'un grand nombre de contraintes (ressources, capacités, délais, coûts). Contrairement à la méthode MRP, plus itérative, utilisée par les ERP, les APS planifient en une seule boucle tous les horizons (stratégiques et tactiques), en utilisant des techniques d'optimisation (programmation linéaire, algorithmes génétiques,...). Le calcul est effectué selon une même fréquence à tous les niveaux, permettant ainsi de visualiser l'information au mois au jour ou à l'année, à l'un quelconque de ces niveaux. En conséquence, les APS augmentent la réactivité des entreprises par une meilleure anticipation des événements et par une meilleure collaboration entre les systèmes d'information et les intervenants de la chaîne logistique. De plus, ils permettent d'améliorer les performances des entreprises :

- en optimisant les coûts et les délais grâce à des fonctions de simulation et d'optimisation
- par une meilleure synchronisation des opérations au sein d'une même fonction et sur toute la chaîne.

Leur principale limite fonctionnelle est de dépendre de la qualité des bases de données dans lesquelles ils puisent les informations nécessaires à l'élaboration de leurs plans, puisqu'ils ne disposent en interne ni de fichier client ni de fichier produit.

---

<sup>12</sup> déchargement et rechargement en continu

<sup>13</sup> cf. l'usine nouvelle, le guide de l'industrie, Hors série juillet 2000

### Les SCE

Les SCE (Supply Chain Execution) ont pour vocation de rationaliser la totalité du cycle de traitement des commandes (de l'entrée à la facturation) [Poldge, 1999]. Pour ce faire, ils fédèrent trois grandes fonctions : la gestion des commandes (prévision des ventes, gestion des achats), de l'entreposage, et des transports. Leur but est d'apporter la réponse la plus rapide à une demande complexe des clients, ainsi que de personnaliser la réponse par profil de client. Ils s'adressent essentiellement à la grande distribution et à ses fournisseurs ainsi qu'aux prestataires logistiques.

Leur principale limite, en plus d'un périmètre fonctionnel restreint, est de compter sur les stocks pour répondre à la demande (gestion en flux poussé), dans un contexte où le marketing de personnalisation tend à raccourcir les cycles et à tendre les flux.

### 2.4.3 ERP versus SCM

Les impératifs actuels de gestion de la chaîne logistique et d'intégration de toutes les fonctions de l'entreprise ont conduit les éditeurs de progiciels de GPAO à enrichir leurs produits de nouvelles fonctionnalités. Force est de constater à l'heure actuelle qu'entre les éditeurs d'ERP ayant intégré un module de gestion de la chaîne logistique (*SAP, ORACLE, PEOPLE SOFT, BAAN*) et un éditeur de SCM ayant intégré des fonctionnalités des ERP (*MANUGISTICS*), il existe peu ou prou de différences. *IRIS GLOBAL BUSINESS* propose ainsi un APS pour optimiser les livraisons en tenant compte des contraintes de charge, d'outillage, de disponibilité des ressources, des circuits d'approbation, etc.

Hormis l'outil de planification employé (que nous considérerons au chapitre suivant), un distinguo entre SCM et ERP pourrait tenir, selon certains éditeurs et utilisateurs, au fait que les ERP impliquent essentiellement des acteurs opérationnels et administratifs, à l'inverse du SCM qui va toucher les stratèges ou les informaticiens d'entreprises. "La dimension décisionnelle est ainsi beaucoup plus importante dans une implémentation SCM" [Freitas, 2000]. Toutefois, l'avenir des ERP ne semble pas remis en cause par l'engouement qui entoure les progiciels de SCM, du fait que la plupart d'entre eux fonctionnent à partir de données fournies par les ERP, garantissant ainsi leur pérennité.

Nous pouvons positionner les progiciels APS, ERP, SCE relativement aux niveaux décisionnels et aux fonctions couvertes (Figure 1.2).

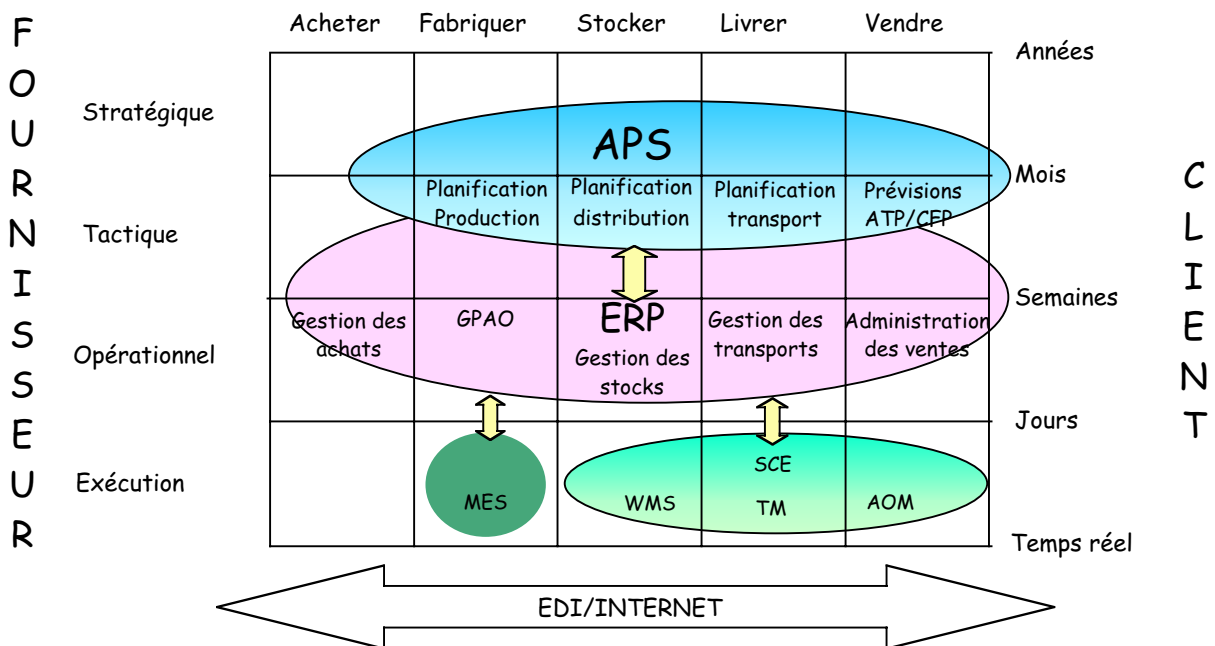


Figure 1.2 : Positionnement des différents progiciels de SCM (Source CXP<sup>14</sup>)

<sup>14</sup> Web CXP : <http://www.cxp.fr>



La gestion de la chaîne logistique se subdivise donc en de multiples segments et sous-segments. Sont aujourd'hui disponibles les outils dont l'objectif est d'aider le logisticien dans sa démarche de gestion de la chaîne logistique globale : les LES (Logistic Executive System : outil d'exécution de la logistique proprement dite), les MES (Manufacturing Execution System : outil d'exécution de la production) etc.

Néanmoins, l'intégration massive des fonctions de l'entreprise nécessite de rattacher les différentes bases de données de l'entreprise et de ses prestataires afin de construire une véritable toile informatique au service de la gestion industrielle. Ce rattachement est possible par l'utilisation d'autres logiciels : systèmes interactifs d'analyse de données, d'entrepôt de données (Data Warehouse), système de gestion et d'extraction de connaissance (Data Mining), etc.

#### 2.4.4 Les sous-segments de la SCM

Les **MES** (Manufacturing Execution System) "délivrent des informations pertinentes en temps réel sur l'exécution des ordres de fabrication afin de les contrôler depuis leur lancement jusqu'à l'obtention des produits finis et d'optimiser les activités de production"<sup>15</sup>. Ceux-ci s'intéressent à cinq entités : les matières, les équipements, le personnel, les documents et l'environnement. Pour les ressources, les MES s'attachent à suivre précisément les causes de mauvaise utilisation pour mieux détecter les axes d'améliorations possibles. Leur principal atout est de fermer la boucle entre la planification et l'exécution en mesurant les écarts. Ils font le lien avec l'ordonnancement d'atelier, la supervision et le suivi de production.

Les volets essentiels des **LES** (Logistic Executive System) concernent la gestion du ou des entrepôts et la gestion des chargements, transports et livraisons<sup>16</sup>. Sur le plan opérationnel, ils peuvent comporter un outil de gestion et d'optimisation des transports et tournées de livraisons.

#### 2.4.5 Les sous-segments de la gestion des informations

Afin de maîtriser la gestion de la chaîne logistique, il est nécessaire de structurer et de partager l'information de façon appropriée. Le Data Warehouse et le Data Mining interviennent respectivement pour l'entreposage des données et l'extraction des connaissances. L'objectif de l'extraction des connaissances est de pouvoir accéder rapidement et de façon sécurisée à des informations agrégées, sans se soucier de l'endroit où elles ont été créées dans le réseau..

#### 2.4.6 Le devenir des outils de gestion

Les systèmes informels de production, caractérisés par un faible niveau d'informatisation et de suivi des activités ont pratiquement disparu de l'entreprise. Ils laissent désormais place à des réseaux de production et des systèmes de gestion des flux globaux basés sur des architectures informatiques structurées et communes aux différentes fonctions et partenaires de la chaîne logistique [Gratacap, 1999].

La démocratisation d'Internet permet par la démultiplication des capacités d'échanges entre les différents acteurs de la chaîne logistique de donner toute sa signification au concept SCM et de développer l'axe collaboratif. La "logistique collaborative", nouveau leitmotiv de différenciation, se matérialise au travers de nombreuses innovations technologiques et applications nouvelles : e-procurement (gestion électronique des achats), e-planning (gestion électronique de la planification), e-commerce (commerce électronique), e-forecasting (gestion électronique des prévisions), messagerie électronique, etc.

### 3 CONCLUSION

Les innovations concomitantes en matière de traitement de l'information, d'organisation d'entreprise et de technologies de production sont une réponse aux nouvelles exigences du marché mondialisé. Les TIC de la nouvelle génération permettent à l'entreprise qui les maîtrise et qui décroche en conséquence son organisation de s'impliquer au sein de réseaux et d'améliorer la valeur des produits et services. La démarche globale adoptée vise ainsi à passer d'une logique traditionnelle de gestion des flux physiques à

---

<sup>15</sup> CXP informations n°255 [Freitas, 1999]

<sup>16</sup> L'usine nouvelle Hors série juillet 2000 [Renouard, 2000]

une logique moderne de gestion des flux d'informations, en intégrant la logistique dès la conception du produit, afin d'anticiper son organisation dans le cadre d'un système logistique global.

Bien qu'indispensables dans le contexte actuel de production, aucun des outils informatiques supports à la gestion de production n'est encore à même de répondre complètement à la problématique de gestion de la chaîne logistique. D'un point de vue fonctionnel, outre l'acquisition de facilités d'aide à la décision permettant une meilleure prise en compte de l'expertise humaine, ou de modules compatibles avec Internet (modules supports à la communication et à l'intégration des différents partenaires), les progiciels actuels doivent selon nous enrichir leur solveur de planification et d'ordonnancement (module MRP pour les ERP ou APS pour les SCM) en les adaptant aux systèmes de production réticulaires.

En effet, nous verrons au prochain chapitre que les méthodes de planification actuellement utilisées ne permettent pas toujours d'obtenir rapidement une solution faisable au niveau ordonnancement. En outre, le besoin de réactivité accru par le nouveau contexte de production, et la nécessité de gérer les différents partenaires de la chaîne logistique viennent corser la problématique de la planification et de l'ordonnancement.

## Chapitre 2

# La conduite des systèmes de production

### 1 LA GESTION DE PRODUCTION

La Gestion de Production recherche une exploitation efficace (vis-à-vis des clients et de l'entreprise) des moyens de production. Elle s'appuie sur un ensemble d'outils d'analyse et de méthodes de résolution de problèmes qui visent à limiter les ressources nécessaires à l'obtention d'une production dont les caractéristiques technico-commerciales sont connues [Giard, 1988]. Le système de production, objet de la gestion, est décomposable en trois sous-systèmes : le sous-système de décision, le sous-système d'information et le sous-système physique [Doumeingts, 1994]. Ce dernier est constitué de l'ensemble des ressources techniques et humaines impliquées dans les activités de transformations. Les décisions à l'origine du déclenchement de ces activités sont prises par le sous-système décisionnel. Enfin le sous-système d'information permet de coordonner les activités décisionnelles avec les activités de production (Figure 2.1).

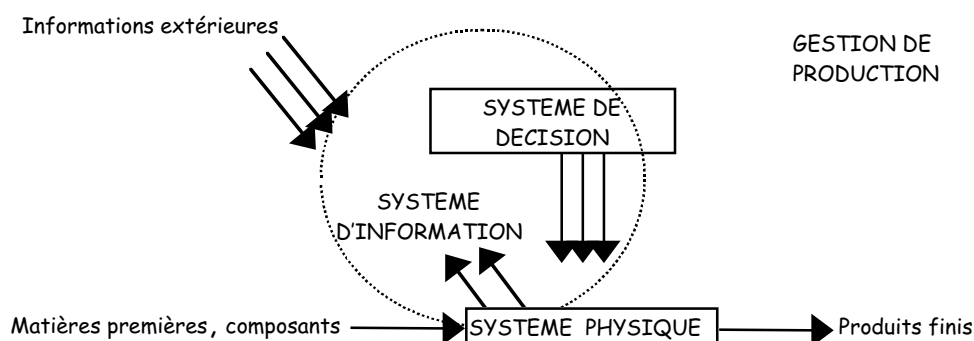


Figure 2.1 : Décomposition du système de gestion de production

Le sous-système décisionnel combiné au sous-système informationnel constituent le système de gestion de production. Les trois fonctions principales de la gestion de production sont :

- gérer les produits,
- gérer les ressources,
- planifier les activités.

Ces fonctions sont déclinées selon différents niveaux de détail et horizons temporels, de manière à maîtriser la complexité de la conduite et du suivi des activités.

#### 1.1 Décomposition du système de gestion de production

La structuration de la Gestion de Production peut s'appréhender selon les points de vue fonctionnel et temporel.

##### 1.1.1 Décomposition fonctionnelle

**Gérer les produits** : cette fonction regroupe les décisions permettant d'assurer la disponibilité des produits dans le temps en fonction des objectifs de production [Marcotte, 1995]. Elle comporte deux

composantes: acheter et approvisionner.

- Acheter : sélectionner les fournisseurs répondant aux critères de coût, de qualité et de délai d'approvisionnement.
- Approvisionner : assurer la fourniture des matières premières en quantité suffisante, de qualité conforme et en temps requis.

**Gérer les ressources** : cette fonction consiste à assurer la disponibilité et la maintenance des ressources technologiques et humaines en fonction des objectifs de production.

**Planifier les activités** : fonction clé de la gestion de production, la planification programme la synchronisation des flux de produits et des ressources au sein du système physique de production.

### 1.1.2 Décomposition temporelle

Trois niveaux de décision sont couramment distingués au sein du système de gestion de production [Anthony, 1965].

- les **décisions stratégiques, au niveau long terme** permettent d'établir le Plan Directeur de Production (PDP) qui prévoit les charges futures du système physique de production, définit les approvisionnements critiques, équilibre les niveaux de stocks (production et vente) et fixe les principaux paramètres de gestion. L'ensemble des décisions stratégiques prend la forme d'un portefeuille d'activités à mettre en œuvre.
- les **décisions tactiques, au niveau moyen terme** concernent l'organisation des produits et des ressources en fonction des prévisions commerciales. Ce niveau permet de convertir le PDP en une planification moyen terme intégrant les besoins résultant des commandes fermes complétées des commandes prévisionnelles et les données techniques pour déboucher sur l'émission des ordres de fabrication (OF) et des ordres d'achat (OA).
- les **décisions opérationnelles, au niveau court terme** déterminent les modalités d'exécution des moyens ainsi que l'exécution des différentes activités de production. Ce niveau confirme les décisions issues du niveau supérieur et précise la mise en œuvre pratique des activités. Il s'agit d'établir un ordonnancement détaillé définissant l'ordre de passage des différents produits sur les ressources et leur date de mise en fabrication, compte tenu des dates de lancement des OF et des délais de fabrication estimés.

Il apparaît ici que la planification et l'ordonnancement participent d'une même fonction décisionnelle, déclinée à différents niveaux de détail.

Une telle classification des décisions traduit une hiérarchie des représentations, à différentes échelles de temps, de la problématique de conduite du système de production. Chaque niveau décisionnel est caractérisé par un horizon, une période et un niveau de détail des informations manipulées. La grille GRAI [Doumeingts, 1998] permet de représenter de façon explicite une structure décisionnelle multi-niveau (Figure 2.2).

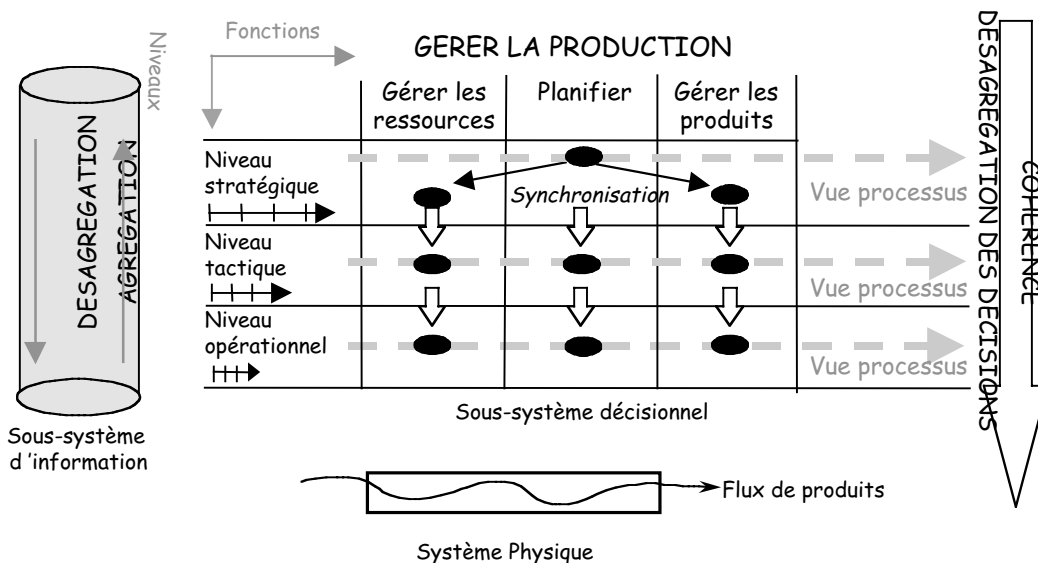


Figure 2.2 : Grille GRAI décisionnelle

## 1.2 La fonction planification

Pour Giard, [Giard, 1988], "La planification de la production est une décision tactique qui répond à un souci de régulation à moyen terme de la production et constitue un lien entre les décisions opérationnelles à court terme et les décisions stratégiques à long terme. ... La planification de la production vise, pour un horizon de planification, en général de quelques mois, à optimiser l'utilisation de facteurs productifs disponibles pour la production d'un ou de plusieurs produits répondant à des caractéristiques précises. Il s'agit d'un processus de traitement d'informations aboutissant à une programmation prévisionnelle s'appuyant sur une démarche d'optimisation".

La nécessité de planifier la production au moyen d'outils rigoureux ne fait toujours pas l'unanimité dans bon nombre d'entreprises. Beaucoup se contentent de créer un OF pour chaque demande sans souci d'optimisation économique (taille des lots de transport, de fabrication). Les lots sont directement lancés en production, le système de production tentant de les traiter au mieux grâce à des pratiques empiriques de gestion. Un tel plan de production peut ne pas être faisable en temps voulu au stade de l'ordonnancement.

L'ordonnancement intervient en effet en aval des décisions de planification. L'ordonnancement consiste à allouer les travaux déterminés à l'issue de la planification aux différentes ressources du système, sur un intervalle de temps donné. Nous retenons la définition suivante de l'ordonnancement : "**Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début**" [Gotha, 1993].

Les deux principales approches de planification étudiées dans la littérature sont le MRP / MRP II (§2.1.1) et la planification hiérarchisée (§2.1.2).

- dans le premier cas, le plan de production est successivement affiné en quatre plans (ou davantage), connectés les uns aux autres via des boucles de régulation (cf. zone 1, Figure 2.3). La méthode MRP est actuellement la méthode de planification la plus répandue dans l'industrie manufacturière [Orlicky, 1975].
- la seconde approche est basée sur la définition d'un plan de production agrégé, par périodes de temps successives. Ce plan est ensuite affiné eut égard aux différents niveaux d'agrégation de produits. On aboutit donc à une cascade de plans de degré de détail croissant (cf. zone 2 , Figure 2.3). L'avantage principal de cette approche est la limitation du nombre de données à prendre simultanément en compte [Hax, 1975], [Bitran, 1981], [Mercé, 1987], [Meier, 1989], [Hetreux, 1996].

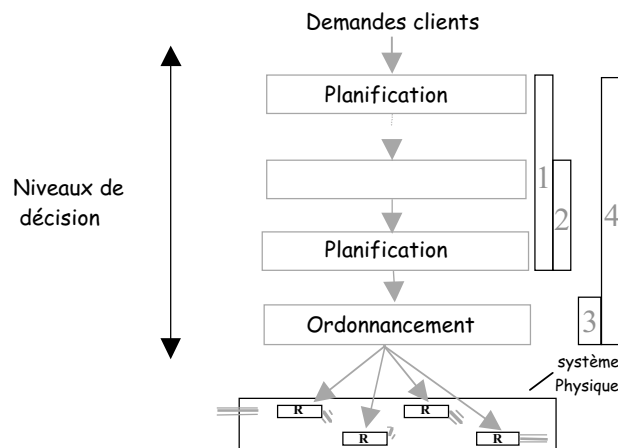


Figure 2.3 - Topologie des approches de planification et ordonnancement

Notons que ces approches procèdent à une planification à capacité de ressource infinie, sans prendre en considération le problème d'allocation tâches/ressources. Ce faisant, de nombreux auteurs (cf.§2.2) se sont penchés sur le problème de l'ordonnancement court terme [GOTha, 1993], [Chu, 1995], [Artigues, 1997],... (cf. zone 3, Figure 2.3).

## 2 LES APPROCHES DE PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

La plupart des travaux concernant la planification hiérarchisée proposent des modèles pour chaque niveau de décision. Deux catégories d'études prédominent selon que l'on considère le problème de la planification moyen terme uniquement [Hax, 1975], [Bitran, 1981], [Axater, 1986], [Hétreux, 1996] ou que l'on y intègre le problème de l'ordonnancement [Fontan, 1985], [Gershwin, 1989], [Dauzere Peres, 1992].

Nous présentons ici les plus représentatives des approches de résolution "séquentielle" des problèmes de planification et d'ordonnancement, puis analysons les approches de résolution intégrée des deux problèmes (cf. zone 4, Figure 2.3).

### 2.1 La planification de la production

#### 2.1.1 L'approche MRP

La planification des besoins en composants par la méthode MRP (Material Requirement Planning) [Orlicky, 1975] vise à assurer, par l'intermédiaire de stocks en composants et produits semi-finis, la disponibilité des ingrédients de fabrication au moment voulu. La philosophie sous-jacente consiste à anticiper la demande en composants par une programmation prévisionnelle. Une organisation typique de la méthode MRP est présentée Figure 2.4.

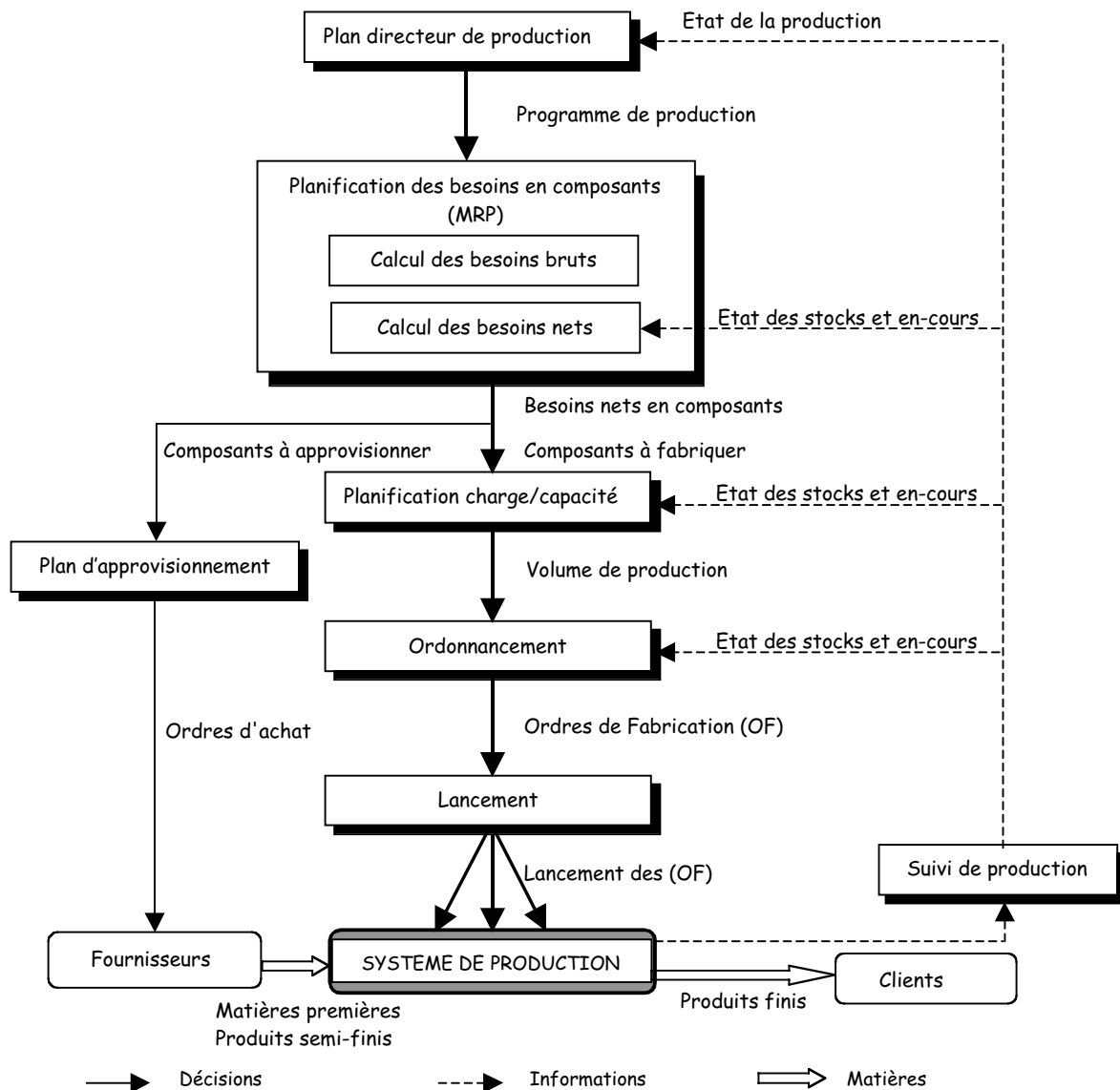


Figure 2.4 : Système de gestion utilisant MRP

Le MRP met en œuvre une séquence de plans : le plan directeur de production (niveau long terme), la planification des besoins en composants (niveau moyen terme), la planification charge/capacité (niveau moyen terme), et l'ordonnancement (niveau court terme).

- le **plan directeur de production (PDP)** définit les types et les volumes de produits à fabriquer à partir du carnet de commandes, des différentes données économiques (marché, production,...) et des prévisions de ventes estimées sur la base d'études de marché ou d'historiques. Ce plan est établi de manière à respecter les délais tout en essayant de limiter les stocks d'en-cours.
- la **planification des besoins en composants (MRP)** définit, période par période, les quantités de matières premières et de produits semi finis nécessaires à la fabrication des produits prévus par le PDP. Cette planification est menée à capacité infinie, en estimant néanmoins les délais de fabrication. Parfois des procédures simples de lot-sizing (groupement par lot) sont intégrées.
- la **planification de la charge** doit garantir que les ordres de fabrication peuvent être exécutés par les ressources et que la charge induite ne dépasse pas la capacité disponible. Lorsque cela n'est pas le cas, un rééquilibrage est effectué, soit en augmentant la capacité de production, soit en lissant la charge (c'est-à-dire en l'étalant dans le temps) soit, en dernier ressort, en modifiant le PDP.
- l'**ordonnancement et le lancement** constituent l'interface entre la planification et la fabrication proprement dite. A ce stade, on spécifie et organise dans le détail les activités qui doivent être lancées au niveau de l'atelier.
- le **suivi de production** permet de contrôler le déroulement de la production. S'il apparaît des dérives trop importantes entre le prévisionnel et le réel, alors un nouveau cycle de planification est initialisé.

La méthode MRP présente certaines limites relatives aux méthodes de calcul des besoins (par recomplètement) employées. En effet, compte tenu de la dynamique de fonctionnement du MRP (concept d'horizon/période propre à chacun des niveaux), ces méthodes supposent la demande régulière. Or, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les marchés sont de plus en plus instables et le nombre de variantes sur un produit (effet de personnalisation) de plus en plus élevé. Cette irrégularité de la demande vient donc fragiliser le calcul des différents plans. De plus, lors du calcul des besoins, la capacité n'est pas prise en compte. Des conflits entre charge et capacité peuvent exister, conduisant soit à une sous-estimation des délais d'obtention du produit (induisant des retards de livraison), soit à une sur-estimation de ces délais (engendrant des stocks).

### Apports du système MRPII

MRP II est une extension de l'approche MRP, dont l'idée de base est d'ajuster la charge en fonction de la capacité disponible à chaque étape du processus décisionnel. Ainsi les besoins en ressources sont examinés à chaque niveau de planification, eu égard à la représentation des charges, des capacités et du temps qui s'y rapportent. Les avantages offerts par l'utilisation de cette méthode sont :

- une meilleure gestion des capacités,
- une diminution des immobilisations en stock,
- une plus grande réactivité et une meilleure maîtrise du contrôle de production.

Le principal inconvénient du MRP II, comme son prédécesseur, est sa forte dépendance à la qualité des prévisions, compromettant son utilisation en cas de demande fortement fluctuante. Un autre défaut du MRP II est de traiter l'information de manière séquentielle, à capacité infinie. Ce faisant, un logiciel basé sur MRP se contente de placer les ordres d'achat et de fabrication en fonction des délais exigés par les clients, ce qui ne garantit nullement la faisabilité opérationnelle du plan de production.

### Les solveurs de planification de type APS

Jusqu'à ces dernières années, les modules de gestion de production des progiciels de gestion intégrés (PGI) étaient tous basés sur le modèle MRP II. Bien qu'ils s'inscrivent dans la lignée des progiciels de gestion intégrée, les outils APS se distinguent par une approche fondamentalement différente. En effet, par leur capacité à prendre en compte des contraintes (de délai, de disponibilité à la vente, de stocks, de transport, etc.) et à gérer des imprévus (pannes, modification de la demande, etc.), les solutions logicielles de type APS permettent de résoudre des problèmes de planification complexes, via des méthodes mathématiques d'optimisation. Ces solutions se révèlent donc plus appropriées, compte tenu du contexte de production.

Loin de révolutionner le monde de la production puisqu'ils recouvrent des concepts qui, pour certains, étaient déjà contenus dans les PGI, le succès de ces outils est liée, d'une part, aux performances technologiques (logicielle et matérielle) qui permettent d'obtenir des solutions sans commune mesure et, d'autre part, à la fréquence de rafraîchissement des données qui est identique sur tous les horizons décisionnels.

Outre un prix d'achat relativement élevé<sup>17</sup>, les APS présentent l'inconvénient de cet outil est de chercher une solution optimale vis-à-vis d'un critère, laissant peu d'autonomie de décision aux utilisateurs.

### 2.1.2 L'approche hiérarchisée

La planification hiérarchisée, contrairement à la démarche MRP, se base sur des données agrégées<sup>18</sup> de production par périodes successives. Le plan ainsi constitué est par la suite affiné selon les différents niveaux de désagrégation de produits, ce qui équivaut à une cascade de PDP de degré de détail croissant.

Au sommet de la hiérarchie, le niveau supérieur de planification résout un problème sur des données agrégées et des horizons temporels longs. Plus on descend dans la hiérarchie, plus les horizons temporels se raccourcissent et les données manipulées sont détaillées. Chaque solution obtenue par un niveau constitue une contrainte pour la résolution du problème au niveau inférieur. La planification consiste donc en raffinements successifs de décisions (désagrégation des décisions) (Figure 2.5).

Cependant, la résolution séquentielle de sous-problèmes de décision dans une approche descendante peut se heurter à des infaisabilités et enrayer le processus décisionnel. La formalisation explicite des liens entre niveaux décisionnels (agrégation des données, désagrégation des décisions) permet par une étude globale des interactions, de garantir le bon fonctionnement de la structure. Deux approches ont été explorées pour garantir la coordination des niveaux :

- l'une consiste à rechercher analytiquement les conditions de cohérence (une décision détaillée est cohérente si elle est compatible avec la décision agrégée) et de robustesse (une décision agrégée est dite robuste si elle assure l'existence d'au moins une décision détaillée) [Mercé, 1987],
- l'autre cherche par itérations successives à assurer la coordination de deux niveaux adjacents [Fontan, 1985].

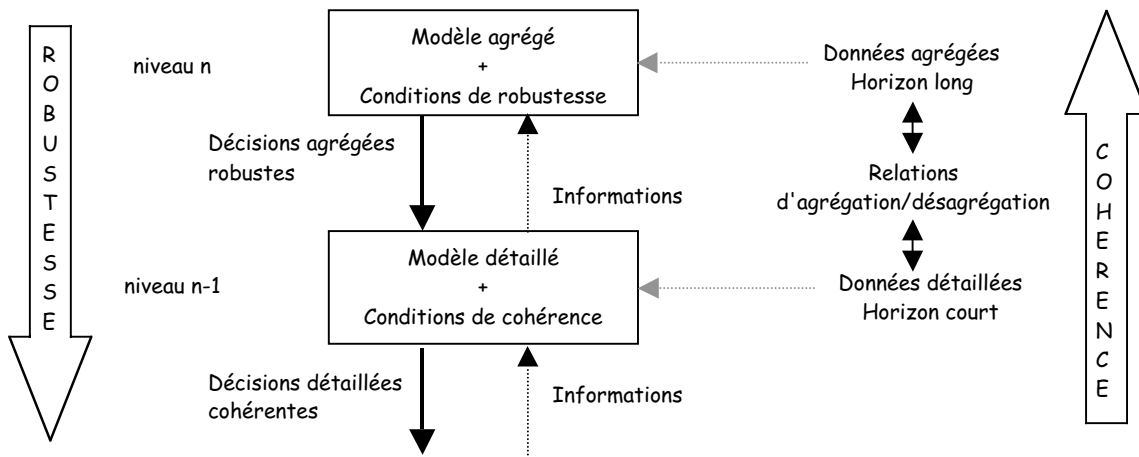


Figure 2.5 : Structure de gestion de production hiérarchisée d'après Mercé, [Mercé, 1987]

Le problème de la planification est posé sur un horizon temporel décomposé en  $n$  périodes  $T_1, \dots, T_i, \dots, T_n$ . La plupart des approches relatives à la planification moyen terme sont basées sur l'équation de conservation des stocks, qui s'écrit au début d'une période quelconque :

$$S(T_i) = S(T_{i-1}) - D(T_{i-1}) + X(T_{i-1})$$

<sup>17</sup> de l'ordre du million de francs.

<sup>18</sup> Mercé définit l'agrégation comme "une forme d'abstraction par laquelle un ensemble de données ou de variables présentant des caractéristiques communes peut être remplacé par une donnée ou une variable agrégée". Dans le cadre de la gestion de production, l'agrégation peut porter sur les matières, les moyens de production, le travail, le temps [Mercé, 1987].



où  $D(T_{i-1})$  représente la demande en produits pendant la période  $T_{i-1}$  et  $X(T_{i-1})$  la production pendant la même période,  $S(T_{i-1})$  et  $S(T_i)$  étant le niveau de stock en fin de période et au début de période suivante.

Les variantes des approches en planification hiérarchisée tiennent notamment aux types de contraintes associées à cette équation, ainsi qu'à la fonction économique (critères) que l'on souhaite optimiser. Généralement, ces critères tiennent compte des coûts pondérés de stockage et de réalisation des produits.

### L'approche Hax et Meal

L'une des toutes premières en planification hiérarchisée, l'approche de Hax et Meal est fondée sur l'agrégation des produits en types et familles et reste très proche des préoccupations pratiques. Une famille est ici formée de produits dont les gammes de fabrication sont similaires, ces produits ne se différenciant que par des caractéristiques secondaires. Un type est un regroupement de familles ayant le même coût unitaire de production, le même coût de stockage et la même demande externe. Le processus de planification est réalisé en trois étapes [Hax, 1975] :

- 1ère étape : une capacité de production est allouée aux différents types de produits, moyennant une résolution par programmation linéaire.
- 2ème étape : pour chaque type, la production est répartie en familles. La désagrégation est effectuée sur la première période de l'horizon seule, de manière à réduire le volume des données requises pour cette étape.
- 3ème étape : la production de chaque famille est répartie entre les articles de sa famille.

### L'approche Axsäter

L'idée est ici encore d'affiner un plan agrégé de production en un plan détaillé, dans une structure décisionnelle limitée à deux niveaux [Axsäter,84], [Axsäter,86]. Le plan détaillé implique les produits et les machines tandis que le plan agrégé considère des groupes de produits et de machines et couvre un horizon temporel plus long. La désagrégation du plan agrégé permet de cadrer la synthèse du plan détaillé correspondant.

Axsäter, dans ses travaux sur la compatibilité des plans détaillé et agrégé (conditions nécessaires et suffisantes de faisabilité), s'intéresse aux mécanismes d'agrégation qui sont à l'origine des informations utilisées par le niveau supérieur pour la planification. L'opérateur d'agrégation proposé est la somme<sup>19</sup> à la fois pour les produits et les ressources. La cohérence entre niveaux se traduit ainsi par un système d'équations linéaires, décrivant les contraintes suivantes :

- la quantité de groupes de produits demandés à la fin de chaque période doit être conforme à la somme des quantités de produits élémentaires demandés à la fin de cette même période, et
- la quantité de macro-ressources demandées à la fin de chaque période doit être conforme à la somme des quantités de ressources élémentaires requises à la fin de cette même période.

La résolution permet d'obtenir les charges et les capacités agrégées. Face aux difficultés théoriques de résolution de ce système, Axsäter propose et évalue numériquement plusieurs heuristiques d'agrégation.

### L'approche Mercé - Hétreux

Les travaux de Mercé ont principalement visé l'analyse des conséquences mutuelles des décisions prises à deux niveaux adjacents de planification. A l'instar de Hax, l'auteur aborde le problème de la planification fondée sur une agrégation homogène<sup>20</sup> des produits, à deux niveaux de planification : agrégée et détaillée.

- la **planification agrégée**, effectuée sur un horizon glissant découpé en périodes, alloue une capacité de production globale aux différents produits agrégés. Pour chaque produit agrégé, on définit la production par période, de manière à satisfaire la demande agrégée, tout en minimisant les coûts associés à ce niveau.
- la **planification détaillée** répartit quant à elle la production agrégée entre les différents produits d'une même classe, en vue de satisfaire la demande détaillée. "Seules les décisions agrégées relatives à cet horizon gelé sont effectivement implémentées et sont, de ce fait, seules soumises à la désagrégation. L'horizon associé au niveau inférieur correspond à cet horizon gelé" [Mercé,1987].

---

<sup>19</sup> En l'absence d'une compatibilité absolue entre plans, il est malgré tout nécessaire de définir de nouveaux opérateurs d'agrégation.

<sup>20</sup> regroupement en familles de produits de produits ne se différenciant que par des caractéristiques jugées secondaires

La désagrégation du plan agrégé est à la charge du niveau détaillé, lequel dispose d'informations supplémentaires et est soumis à des contraintes invisibles au niveau agrégé. Deux processus de désagrégation, statique et dynamique, sont différenciés [Mercé, 1997] :

- le premier correspond à un fonctionnement en boucle ouverte sur l'horizon du niveau détaillé. La désagrégation du plan ne prenant pas en compte l'évolution réelle du système,
- le second, au contraire, correspond à un fonctionnement en boucle fermée. En effet, au début d'une période, seule la partie du plan agrégé couvrant entièrement cette période est désagrégée.

A la suite des travaux de Mercé, Hétreux s'intéresse à l'agrégation temporelle des données de planification, qui se traduit par "le regroupement dans une macro-période d'un ensemble de périodes élémentaires consécutives" [Hétreux,95] [Hétreux,96]. La structure envisagée est à deux niveaux d'échelle de temps. Le niveau supérieur établit un plan valable sur un horizon découpé en macro-périodes. Ce plan est ensuite désagrégé sur la base des données détaillées disponibles sur un horizon plus court, découpé lui-même en périodes élémentaires. L'auteur analyse les interactions entre niveaux afin d'établir des conditions de robustesse et de cohérence. Ces différentes conditions sont introduites dans les modèles sous forme de contraintes à respecter. L'analyse est fondée sur l'étude des conditions de résolution du **modèle d'étude des interactions**, qui regroupe toutes les contraintes que doivent satisfaire les décisions détaillées et agrégées. "Pour assurer la robustesse du plan agrégé, il faut construire un modèle dans lequel les décisions agrégées sont mises en relation avec les contraintes issues du niveau inférieur et, pour assurer la cohérence de la désagrégation, il faut construire un modèle qui permette de relier les décisions détaillées à élaborer avec les contraintes imposées par le niveau agrégé".

## Conclusion

Bien que les approches de planification hiérarchisée permettent de limiter la quantité de données à prendre simultanément en compte, leur principal inconvénient tient au fait que l'on ne cherche à déterminer un ordonnancement compatible avec le plan de production qu'une fois celui-ci établi. Le modèle de planification ne tient par conséquent pas compte des ressources détaillées de l'atelier et se base sur des capacités agrégées qui reflètent rarement l'état réel des disponibilités de ces ressources. Le risque est donc élevé de devoir consentir un effort considérable pour obtenir un plan détaillé faisable, sans que pour autant l'ordonnancement des activités soit garanti.

D'autre part, l'analyse de la littérature sur les approches de planification ne nous a pas permis d'identifier de cadre conceptuel d'agrégation permettant l'obtention structurée des informations agrégées<sup>21</sup>. Certaines études concernent l'agrégation des ressources uniquement [Meier,89], d'autres l'agrégation des ressources et produits simultanément [Axsäter,86], d'autres enfin l'agrégation du temps uniquement [Hétreux,96], les données agrégées manipulées n'ayant donc pas toutes le même degré de détail.

### 2.1.3 L'approche OPT

L'approche OPT (Optimized Production Technology) cherche à optimiser les flux de production en se concentrant sur la planification des ressources ou postes goulets [Goldratt, 1992]<sup>22</sup>. Il s'agit d'analyser l'adéquation entre la capacité de l'ensemble des moyens de production et la demande en produits finis, afin d'identifier les ressources goulets et limiter la formation de stocks, générateurs de dépenses d'exploitation. Cette approche a donné naissance à un progiciel du même nom.

Le système OPT remet en question certaines règles de base utilisées couramment en gestion de production. Les trois idées-forces de la méthode OPT sont les suivantes :

- "La charge d'une usine ne doit pas être équilibrée, ....., il est impossible d'adapter en permanence la capacité maximale des moyens de production à la demande du marché". Par exemple, dans le cas d'un planning établi, la superposition d'événements dépendants (opérations successives de fabrication) et de fluctuations statistiques (temps de préparation, temps de fabrication,...) peut induire des retards et rendre l'usine inefficace.
- "La formule de Wilson n'est pas adaptée au calcul de la taille des lots". En effet, ainsi calculée la quantité économique du lot à fabriquer est invariable durant toutes les étapes du cycle fabrication, ce qui est contraire aux objectifs de réduction des cycles de fabrication poursuivi par les entreprises.

---

<sup>21</sup> Ce constat a, dans notre laboratoire, motivé les travaux de Zolghadri [Zolghadri, 1998] qui servent de base à cette thèse.

<sup>22</sup> OPT considère qu'une usine dans laquelle toutes les ressources sont occupées à 100% de leur capacité est une usine inefficace

- "Les résultats de la comptabilité analytique doivent pouvoir être exploités différemment par les ateliers et la comptabilité" [Mestoudjian, 1987].

La mise en œuvre du système OPT repose sur neuf principes de base qui découlent des trois constats précédents [Goldratt, 2000]. Le principal avantage de cette méthode est que, grâce aux capacités de simulation qu'elle présente, il est possible de gérer des ateliers à très court terme avec des plannings plus fiables que ceux obtenus par l'utilisation de la méthode MRP, cette dernière n'intégrant pas les aléas qui surviennent dans l'atelier. Son principal inconvénient est que l'algorithme de base n'est pas divulgué.

## 2.2 L'ordonnancement de la production

La résolution d'un problème d'ordonnancement doit concilier deux objectifs :

- un **objectif statique**, qui consiste à générer un plan de réalisation des travaux sur la base de données prévisionnelles, connues au début de l'intervalle de temps que l'on souhaite couvrir, et
- un **objectif dynamique**, qui consiste à prendre des décisions pendant la production compte tenu de l'état des ressources et de l'avancement des différents tâches.

Les problèmes d'ordonnancement peuvent être énoncés comme des problèmes d'optimisation sous contraintes. De ce fait, de nombreuses méthodes de résolution de ces problèmes utilisent des techniques d'optimisation combinatoire. Le caractère fortement combinatoire limite la portée des approches exactes (Problèmes NP-complets). En ce qui concerne les problèmes de grande taille, on ne peut qu'espérer obtenir des solutions approchées grâce à des heuristiques. Pour ce qui est des problèmes de taille raisonnable, des algorithmes existent, fonctions du nombre de données à prendre en compte ou encore du critère à optimiser.

De nombreuses études visant à résoudre le problème de l'ordonnancement ont été menées. Plusieurs classifications de la pléthore d'algorithmes identifiés ont été établies. Nous retiendrons les classifications proposées par le groupe Gotha [Gotha, 1993], Cardeira [Cardeira, 1994] et Nagar [Nagar, 1995].

### 2.2.1 La classification proposée par le Gotha

On trouve dans [Gotha, 1993] un état de l'art des approches de résolution du problème d'ordonnancement selon que la méthode employée est exacte ou approximative :

- les méthodes de **résolution exactes** : méthodes de programmation linéaire [Portmann, 1994], de programmation dynamique [Schrague, 1978], les procédures par séparation et évaluation progressives [Carlier, 1988].
- les méthodes de **résolution heuristiques** : méthodes de construction par règles de priorité [Boucon, 1991], de décomposition [Portman, 1988], de voisinage [Van Laarhoven, 1992], et méthodes d'Intelligence Artificielle (algorithmes génétiques [Talbi, 1991], [Mesghoumi, 1998], [Park, 1995] réseaux de neurones [Hellstrom, 1992], OPIS, SONIA, SOJA),

Le principal inconvénient de ces approches de résolution réside dans le fait que l'on n'obtient que très rarement une solution globalement optimale, en raison de la présence d'optima locaux.

### 2.2.2 La classification proposée par Cardeira

Cardeira propose une classification des algorithmes d'ordonnancement des tâches dans les systèmes temps réels et répartis selon huit critères [Cardeira, 1993] :

- les caractéristiques des tâches à ordonnancer (contraintes temporelles, priorité, interruptions, relations, ...),
- la distribution des tâches et des fonctions d'ordonnancement (ordonnancement global ou local),
- les modes d'exécution de l'algorithme d'ordonnancement (en ligne ou hors ligne),
- les caractéristiques des ressources matérielles (monoprocesseurs, ou multiprocesseurs)
- la qualité de la solution obtenue,
- les critères optimisés (minimisation de la longueur de l'ordonnancement, équilibrage de charge,...),
- les techniques utilisées pour élaborer une solution d'ordonnancement (théorie des graphes, heuristiques, recuit simulé, théorie des files d'attente, algorithmes génétiques, réseaux de neurones, logique floue, ...).

### 2.2.3 La classification proposée par Nagar

La résolution du problème d'ordonnancement peut être conditionnée par l'optimisation de plusieurs critères parfois antagonistes. Nagar propose un état de l'art détaillé des problèmes d'ordonnancement à critères multiples [Nagar, 1995]. La classification établie repose sur :

- la nature du problème (déterministe ou stochastique),
- la configuration de l'atelier (machine unique, atelier de type job shop, flow shop ou open shop),
- la méthode de résolution employée (programmation mathématique, méthodes d'intelligence artificielle),
- les mesures de performance employées (régulière : makespan, ou non régulière : date de début au plus tôt des opérations),
- les critères (bi-critères ou multicritères).

L'ensemble des approches d'ordonnancement précitées visent à fournir la meilleure solution, au sens d'un critère donné, au problème d'ordonnancement. Bien que les décisions d'ordonnancement agissent sur les décisions de planification et inversement, on constate que la plupart des auteurs ont étudié ces deux fonctions indépendamment l'une de l'autre, rendant illusoire la recherche d'un ordonnancement optimal. Aussi, certains auteurs se sont intéressés au couplage entre planification et ordonnancement, en vue de la résolution intégrée de ces deux problématiques.

## 2.3 Les approches intégrées de planification/ordonnancement

Dans ces approches, le niveau planification fixe la production désirée par période ainsi que la capacité requise pour cette production. Le niveau ordonnancement ventile par la suite l'exécution des opérations en les affectant aux différentes ressources.

La planification influe sur l'ordonnancement par la détermination de la production requise en différents produits, ce qui se traduit par un ensemble d'opérations à ordonnancer. A contrario, l'influence de l'ordonnancement sur la planification se traduit par une répartition de charges dans le temps et peut aboutir à violer les échéances imposées.

### 2.3.1 L'approche Fontan et Imbert

Un modèle à deux niveaux de planification et ordonnancement est défini par Fontan et Imbert [Fontan, 1985]. Le niveau planification a en charge la détermination d'un ordonnancement faisable sur un horizon discrétisé en périodes. Le second niveau doit, en ajustant les volumes ou capacités de production, déterminer s'il existe un ordonnancement faisable sur toute la durée de la première période. Cette procédure est itérée d'un niveau à l'autre jusqu'à l'obtention d'un ordonnancement faisable. S'il n'existe pas d'ordonnancement faisable, le plan de production du niveau supérieur est remis en cause par relaxation de certaines contraintes :

- soit la durée de la première période est augmentée
- soit le volume de production dans cette même période est diminué.

Cette approche permet de résoudre des problèmes relativement importants. Cependant, la relaxation de certaines contraintes par le niveau haut peut induire des retards de fabrication inacceptables pour l'unité de production.

### 2.3.2 L'approche Lasserre, Dauzere-Peres et Roux

Le modèle de planification et ordonnancement intégré développé par Lasserre puis Dauzere-Peres propose des conditions nécessaires et suffisantes d'existence d'un ordonnancement pour le plan de production calculé et répond ainsi au problème de maintien de la cohérence entre les deux niveaux décisionnels [Lasserre, 1989], [Dauzere-Peres, 1992].

La procédure de calcul itérative permet :

- la résolution d'un problème de planification pour une séquence fixée de passage des produits sur les machines. Cette résolution assure l'existence d'au moins un ordonnancement faisable,
- la résolution d'un problème d'ordonnancement pour des tailles de lots fixés. Cette résolution détermine la meilleure séquence pour un plan donné.

Cette technique appliquée à des ateliers de type Flow-shop a été généralisée par Roux à des ateliers de production plus complexes se rapprochant de cas réels, au moyen d'une méthode d'ordonnement de type Tabou (utilisée dans la première phase de la procédure) [Roux, 1997]. Ce dernier auteur peut ainsi prendre en compte les concepts de flexibilité, de non-linéarité des gammes de fabrication, de fabrication multi-sites, ainsi que ceux d'ordonnement avec partage de lots. La procédure de calcul est itérée dans le cas présent pour améliorer la solution (recherche d'une solution optimale) et non comme dans l'approche Fontan et Imbert pour déterminer une solution admissible.

Ce modèle présente l'avantage de tenir compte des capacités exactes du niveau ordonnancement, rendant plus facile et rapide la recherche d'une solution faisable.

### 2.3.3 L'approche Gershwin

Gershwin propose de traiter les problèmes de planification et d'ordonnement stochastiques par un découpage en différents niveaux hiérarchiques [Gershwin, 1989]. Le critère de découpage utilisé est la fréquence d'occurrence des événements ou opérations (les événements ayant des fréquences d'occurrence proches sont regroupés).

Au niveau le plus haut de la hiérarchie, la demande varie au cours du temps et l'objectif est de déterminer les taux de production qui minimisent les coûts de production et de stockage. Aux autres niveaux, la demande est supposée constante et la politique de contrôle, qui consiste à assurer une marge au-dessus de la demande prévue est mise en œuvre par programmation dynamique (équation de Bellman [Bellman, 1982]). Enfin, au dernier niveau, Gershwin définit une règle d'éligibilité d'opérations, afin de déterminer leur ordre de passage sur les ressources.

Le modèle développé par Gershwin présente l'originalité d'intégrer simultanément des variables contrôlables et incontrôlables (maintenance, temps de préparation, pannes, ...) et permet de formuler de façon unique le problème de l'allocation tâches/ressources indépendamment du niveau de détail considéré. [Gershwin, 1994].

## 2.4 Conclusion

L'étude des différentes approches de résolution des problèmes de planification et d'ordonnement de la production nous a conduit à dresser le bilan suivant :

- au regard des différentes approches, il paraît clair qu'en raison de la complexité des systèmes de production, une gestion de production optimale ne peut être effectuée qu'au travers d'une structure hiérarchisée, permettant à chaque niveau de disposer de données de niveau de détail adéquat, en quantité raisonnable.
- il apparaît également que la cohérence et la robustesse des décisions au travers d'une telle structure ne peuvent être garanties si les interactions entre niveaux ne sont pas prises en compte de manière explicite.
- bien que la recherche d'une solution optimale puisse paraître d'un profond intérêt et expliquer l'ardeur avec laquelle certains auteurs s'y emploient, un problème fondamental relatif à l'agrégation des données et la désagrégation des décisions subsiste. En effet, seule la résolution de ce problème peut permettre de garantir la cohérence et la robustesse d'un système décisionnel multi-niveaux.

Ce constat nous conduit à penser qu'un modèle de données unifié et récursif, quel que soit le niveau du problème de planification et allocation tâche/ressource, serait un atout en offrant une meilleure lisibilité et cohérence entre niveaux.

L'évolution du contexte de production et la nécessité de coordonner les activités du partenariat d'entreprises amènent à généraliser les problèmes de planification et d'allocation de travaux à l'échelle du réseau d'entreprises. Il ne s'agit plus dès lors de planifier la production uniquement sur des ressources propres, mais également sur d'autres ressources accessibles par coopération. En plus des contraintes de gestion de production classiques, les méthodes de gestion de production se doivent dorénavant d'intégrer des contraintes relatives aux clients, fournisseurs, sous-traitants et donneurs d'ordres, ainsi que des contraintes logistiques. On aboutit ainsi à une problématique généralisée de conduite à la fois hiérarchisée (notamment au sein d'une même entreprise) et distribuée (entre entreprises) des systèmes de production.

Le paragraphe suivant est dédié aux approches de gestion multi-site de la production, qui confèrent aux organisations industrielles modernes leur spécificité.

### 3 LES APPROCHES MULTI-SITE

Les réseaux d'entreprises sont devenus l'objet d'étude de nombreux chercheurs tant d'un point de vue structurel (organisation du partenariat et des infrastructures de communication sous-jacentes) que d'un point de vue fonctionnel (organisation et gestion de la production et de la logistique).

Nous présentons dans les paragraphes suivants les méthodes de planification et architectures multi-site les plus représentatives, puis montrons la nécessité de disposer d'un système d'aide à la décision adapté au contexte d'entreprise étendue.

#### 3.1 La planification multi-site

##### 3.1.1 Définition

Unanimentement, le problème de planification mono-site consiste à déterminer **quoi produire** après regroupement des carnets de commandes de l'entreprise, **quand produire** (dans quelle période) et **où produire** (sur quelle ressource interne) compte tenu de contraintes (économiques : taille des lots de production par exemple, physiques : utilisation d'une ressource, ...) et d'objectifs de rentabilité locaux à l'entreprise considérée. Bien que les solutions attendues d'un problème de planification multi-site (PMS) soient sensiblement les mêmes, les hypothèses de base sont cependant plus complexes.

En effet, la problématique de la PMS consiste, selon nous et comme précédemment, à déterminer **quoi produire** après regroupement des carnets de commandes des différents sites, **quand produire** (étant entendu que les bases de temps peuvent être disparates entre sites) et **où produire** (sur quelle ressource interne et/ou externe accessibles par coopération), mais également **quoi transporter, quand transporter et où transporter** compte tenu de contraintes (économiques et physiques, de transport et de production) et d'objectifs à la fois locaux à chaque site et globaux du réseau.

Nous retrouvons dans cette définition les quatre sous-problèmes de la PMS [Le Page, 1993], [Thierry, 1994].

- Le **problème d'affectation** des ressources, qui consiste, en tenant compte de la capacité des ressources, à déterminer pour chacune d'elle la quantité de tâches devant lui être affectée.
- Le **problème de séquençement** ou problème d'ordonnancement, qui consiste à programmer dans le temps l'exécution des tâches sur les ressources en leur fixant des dates de début.
- Le **problème de dimensionnement des lots**, qui consiste à déterminer la taille des lots de fabrication des produits. Le dimensionnement des lots permet de définir les tâches au niveau de l'affectation et du séquençement.
- Le **problème de transport** consistant à déterminer quels sont les produits qu'il faudra transporter, dans quelle quantité et à quel moment.

Ces auteurs illustrent le problème de la planification multi-site, soumis aux données, objectifs, contraintes et critères présentés dans le tableau 2.1, de la façon suivante (Figure 2.6).

Données	Objectifs	Contraintes	Critère
- des commandes, - des produits, - de la nomenclature des produits, - des sites de production, - des ressources disponibles.	Définir : - quels produits fabriquer, - dans quelles quantités, - sur quelle unité de production, - quand.	- les contraintes de précedence liées à la nomenclature - les contraintes de limitation des ressources - les contraintes de date au plus tard	- minimiser le coût total de production.

Tableau 2.1 : Données, objectifs et contraintes de la PMS (d'après Le Page)

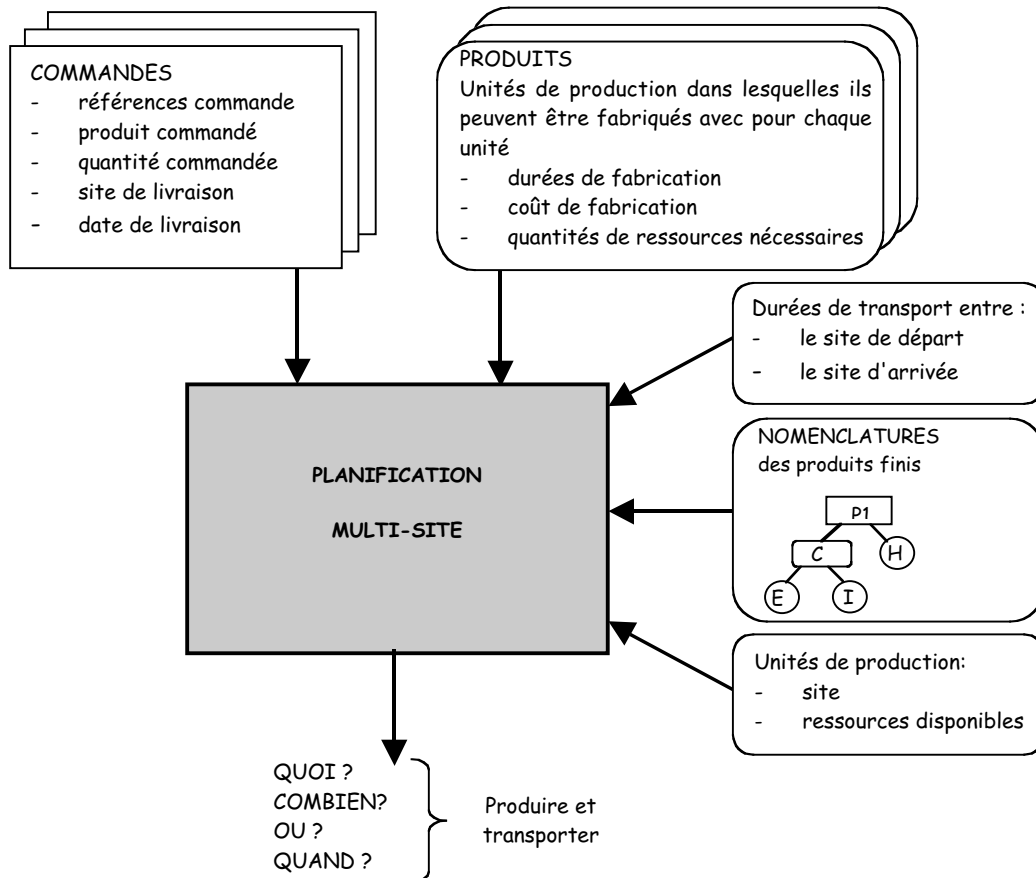


Figure 2.6 : Le problème de planification multi-site (d'après Thierry)

Deux types d'approches sont envisageables pour traiter un problème de PMS : l'approche centralisée et l'approche distribuée.

- Dans le cas d'une approche centralisée, le système de planification multi-site établit, après groupement des carnets de commandes des différents sites, un plan de production pour chacune des unités de production locales.
- Dans le cas d'une approche distribuée, chaque unité de production possède un système local de planification et échange des informations avec les autres unités de production. Par unité de production, on entend ici soit un site de production, soit, à l'intérieur du site, une installation déterminée (atelier, cellule, etc.).

Dans une structure distribuée, plusieurs centres de décisions peuvent coexister à un même niveau hiérarchique. L'autonomie laissée aux différentes unités de production permet d'améliorer leur réactivité aux aléas locaux. Par ailleurs, la communication d'un niveau décisionnel à l'autre étant moins fréquente, la fiabilité des informations est accrue. En outre, une structure de production distribuée permet de laisser à chaque site le soin d'utiliser une méthode de gestion de production propre (KANBAN, MRP, ...).

### 3.1.2 Les principales approches

#### L'approche Le Page [Le Page, 1993]

Le Page s'est consacré à l'étude des relations de type client/fournisseur entre une entreprise et son environnement. Parmi les thèmes abordés se trouve celui de l'ordonnancement et de la planification multi-site, que l'auteur propose de traiter par une approche multi-agent. Les hypothèses sont les suivantes :

- chaque site de production possédant ses propres objectifs et contraintes à satisfaire est supposé autonome et possède son propre système de gestion de production,
- les échanges entre sites concernent les produits et les informations,

- un même produit peut être réalisé sur plusieurs sites et doit dans tous les cas avoir des phases de fabrication dans des sites différents.

Le modèle de simulation proposé est constitué d'agents microscopiques<sup>23</sup>. Chaque agent "site de production" étant composé de quatre sous-agents :

- un sous-agent service clientèle dont le rôle est de maximiser le chiffre d'affaire,
- un sous-agent service planification qui doit minimiser les coûts de fabrication, tout en respectant les délais,
- un sous-agent service ordonnancement dont le rôle est de lisser la charge de travail à court terme,
- un sous-agent service fabrication représentant le système physique.

Les informations relatives à l'état d'un site sont centralisées sur un tableau de suivi de production. Un processus de négociation en plusieurs étapes est défini entre agents et sous-agents afin d'optimiser la coopération entre sites.

Le modèle ainsi constitué a été implémenté grâce à un langage d'acteur [Hewitt, 1973 in Le Page, 1993] permettant la gestion du temps dans un univers d'acteurs discrets.

### **L'approche Thierry [Thierry, 1994]**

Thierry a, conjointement aux travaux de Le Page, proposé un modèle du problème de planification multi-site ainsi qu'une méthode de résolution afin de déterminer comment répartir dans le temps des productions correspondant aux commandes clients sur les différents sites, tout en optimisant des critères globaux. Le système de planification multi-site est ici centralisé<sup>24</sup>. Le modèle permet de prendre en compte les contraintes de respect des délais de fabrication imposés par le client, de conservation des stocks, de transports, de séquençement des tâches à effectuer, de capacité finie des ressources de production.

Par extension du modèle de base, il est possible d'intégrer les pertes dues aux défauts de fabrication, les temps de préparation des opérations, les contraintes liées à la présence des différents prestataires (clients, sous-traitants et fournisseurs). Ce modèle permet également de gérer les différents degrés de fiabilité des données par introduction de périodes de taille variable au sein d'un même horizon de planification.

Le principe de résolution de l'approche intégrée planification/ordonnancement est le suivant : chaque fois qu'une quantité de produits est planifiée sur une unité de production et une période de temps, il s'agira au cours du processus de résolution du problème de planification :

- d'affecter cette quantité à une ressource de l'unité de production,
- de vérifier que cette quantité peut être placée au niveau ordonnancement en prenant en compte les tâches déjà ordonnancées et les contraintes de ce niveau (séquençement des tâches sur les ressources).

Le problème d'ordonnancement, classique de type job-shop ou flow-shop, est résolu de manière séquentielle au moyen d'un algorithme à une passe. Il est à noter que le dimensionnement des lots est identique aux niveaux planification et ordonnancement.

A chaque étape, les décisions peuvent être remises en cause s'il n'existe aucune séquence permettant de vérifier les contraintes de l'ordonnancement, s'il n'y a pas de ressource disponible pour la fabrication du lot et/ou s'il n'y a pas d'instanciation possible d'une variable de décision.

L'applicabilité des travaux de Thierry a été démontrée au travers du projet DISCO (projet ESPRIT n°5178, [DISCO, 1992])

### **L'approche Rota [Rota, 1998]**

Rota a, suite aux travaux précédents, proposé un ensemble d'outils et de méthodes permettant à une entreprise impliquée dans une ou plusieurs chaînes logistiques de mieux coordonner à moyen terme ses activités avec celles de ses clients, donneurs d'ordres, fournisseurs et/ou sous-traitants.

Le modèle proposé permet de déterminer une planification d'activités :

---

<sup>23</sup> les agents microscopiques par opposition aux agents macroscopiques reflètent le comportement d'entités fines (désagrégées) dont on connaît avec précision le comportement interne

<sup>24</sup> dans le sens où les productions à réaliser sont fournies aux différents sites par un système de planification unique



- interne à l'entreprise : (quoi, quand, où), tout en respectant les contraintes de capacité des ressources et la politique de gestion de la production,
- externe à l'entreprise : gestion des approvisionnements par les fournisseurs et distribution vers les sous-traitants et vers les clients.

Il est composé de deux sous-modules pouvant être utilisés séparément ou conjointement :

- le premier est dédié à la planification des commandes fermes,
- le second est dédié à la planification des commandes prévisionnelles.

Le problème de planification est énoncé sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire sous contraintes. Relevant de la classe des modèles de lot-sizing, il inclut les extensions liées aux décisions d'approvisionnements, et à la planification de la distribution.

Les informations relatives à l'état de l'entreprise et de ses partenaires étant susceptibles d'évoluer au cours du temps, le modèle précédent est enrichi d'un simulateur à événements discrets à pas constant, qui associe à chaque acteur un modèle de comportement dynamique.

#### L'approche Archimède

Archimède propose au LGP de Tarbes une méthode pour aborder le problème de l'ordonnancement multi-site d'ateliers flexibles de production organisés hiérarchiquement. Pour chaque site, l'élaboration d'un ordonnancement nécessite d'alterner des planifications à capacité infinie et des planifications à capacité finie. Cette méthode est basé sur l'utilisation du modèle multi-agent SCEP (Superviseur, Client, Environnement, Producteur) où :

- l'environnement est un ensemble d'opérations à positionner sur des ressources,
- l'agent OF (représentant du client) planifie à capacité infinie les opérations,
- l'agent machine ou producteur planifie à capacité finie les opérations sur les machines,
- l'agent superviseur coordonne les interventions des agents OF et machine selon un mode de fonctionnement qui peut être soit prévisionnel, soit réactif [Archimède, 2000].

L'approche multi-agent permet de conférer à chaque agent un pouvoir de décision local afin de gérer les aléas survenant en cours de fabrication et ce quel que soit leur niveau d'apparition.

Dans un contexte multi-site, l'activité décisionnelle de l'agent machine est de déléguer à une autre unité les tâches qu'il ne peut exécuter lui-même et d'attendre en retour le résultat de la production. L'étude des interactions entre les différents agents permet d'obtenir une solution globale au problème d'ordonnancement d'ateliers distribués.

#### L'approche Guinet

Guinet de l'INSA de Lyon a développé pour le pilotage des systèmes de production multi-site une approche de gestion de production à deux niveaux : planification et ordonnancement [Guinet, 1997].

- au premier niveau, une approche primale-duale est utilisée pour la résolution du problème de planification globale à capacité finie multi-site,
- au deuxième niveau, une heuristique d'ordonnancement multi-atelier a été développée afin de gérer localement chaque site.

Les exigences en termes de charge/capacité étant incluses dans l'ordonnancement d'ateliers multi-niveaux de la gestion de production, l'approche développée par Guinet permet de contourner les deux principales faiblesses du MRP : les risques d'incompatibilité entre planification et ordonnancement, tant pour des raisons de capacité des ressources que de disparité des horizons temporels.

#### L'approche Roux

Les travaux de Roux se basent, comme indiqué au paragraphe 2.3.2, sur le modèle développé par Lasserre, et présentent l'avantage de considérer la capacité exacte de l'atelier de production au moyen de contraintes nécessaires et suffisantes [Roux, 1999]. Les contraintes prises en compte sont :

- la conservation des stocks,
- les précédences entre tâches,
- la capacité du système et les disjonctions entre activités.

Roux étend la proposition de Lasserre afin d'intégrer l'environnement étendu de la production et propose de résoudre le problème d'ordonnancement multi-site en tenant compte de la capacité exacte des différents niveaux et des lots de produits quel que soit le type d'atelier. L'auteur différencie deux types de demandes : internes (dépendantes de la gestion locale) ou externes (indépendantes de la gestion locale) et part de l'hypothèse que la production est contrôlée indépendamment dans chaque site.

		<b>CERT</b>	<b>Guinet</b>	<b>Archimède</b>	<b>Roux</b>
<b>Hypothèses</b>	Commandes prévisionnelles	o			
	Commandes fermes	o		o	
	Temps de préparation	o		n	
	Ressources polyvalentes			o	
	Ressources disjonctives			o	o
	Opérations permutables			o	
	Opérations Préemptives			n	
	Temps de transport	o	o	n	
	Délais de fabrication variables			o	
<b>Contraintes</b>	Conservation des stocks	o	o	o	o
	Capacité finie des ressources	o	o	o	o
	Couverture des travaux	o	o	o	
	Précédence entre tâches	o	o	o	o
	Transports	o	o	n	
<b>Planification</b>	Mode prévisionnel	o		o	o
	Mode réactif	o		o	o
	Ordonnancement	o	o	o	o
	Planification de la logistique	o		n	
<b>Approche</b>	Optimisation	o	o	n	o
	Itérative	o	o	o	o
<b>SIAD</b>			n		

Tableau 2.2 : Comparatif des approches de PMS

### 3.1.3 Conclusion

Les principales caractéristiques (hypothèses et contraintes prises en compte) des approches de planification multi-site précédemment présentées sont répertoriées dans le tableau 2.2.

Tous ces travaux ont en commun de proposer une solution en cherchant à prendre en compte la capacité des ressources afin de pallier les incohérences entre les phases de planification et ordonnancement.

La plupart utilisent des méthodes d'optimisation combinatoire et présentent, de fait, l'inconvénient de fournir la meilleure solution au sens d'un critère qui bien souvent consiste à optimiser la productivité du réseau considéré. Or, dans un réseau d'entreprises, chaque partenaire possède des objectifs et critères qui lui sont propres et, parfois, différents de ceux du réseau. De plus, dans un contexte de production incertain, complexe et changeant, il convient d'être réactif et adaptable à la variabilité de la demande. Les critères se doivent donc d'être évolutifs de manière à refléter et intégrer au mieux les contraintes émanant du contexte de production. Par ailleurs, il est à noter que ces méthodes sont itératives, ce qui pose le problème de la convergence et de la vitesse de convergence vers une solution admissible.

Outre l'apport de fonctionnalités de gestion de production proprement dite, un travail préparatoire (formatage des données, choix des partenaires, ...) est nécessaire préalablement à la mise en œuvre effective d'un réseau d'entreprises. En effet, la résolution de chaque sous-problème local ne peut se faire indépendamment des interactions avec les autres sites. Il s'agit alors de caractériser des modes de coopération entre les centres de décisions associés à chaque site, qui puissent garantir l'obtention d'une solution globale satisfaisante. Les problèmes de communication et la pertinence des informations échangées s'avèrent donc fondamentaux pour la réussite d'une telle approche. Divers projets ont tenté de définir des infrastructures et des fonctionnalités permettant de structurer les réseaux d'entreprises, en particulier :

- le projet NIIIP<sup>25</sup>, dont l'objet est d'adopter et de développer, démontrer et disséminer les technologies supports aux entreprises virtuelles,
- les projets PRODNET et PRODNET II<sup>26</sup> qui posent les fondements d'une infrastructure pour le support des entreprises étendues ou virtuelles,
- le projet MASSYVE<sup>27</sup> qui propose une infrastructure pour le développement d'architectures de référence.

Ces différents projets sont décrits au paragraphe suivant.

## 3.2 Les architectures de références

### 3.2.1 Le modèle NIIIP

Le consortium américain National Industrial Information Infrastructure Protocols s'attache à développer des protocoles pour le partage des informations, coûts et savoir-faire entre différentes entreprises afin de faciliter les partenariats industriels, et ce malgré l'hétérogénéité des matériels informatiques, des environnements et processus opératoires. En effet, la mise en œuvre du paradigme d'Entreprise Virtuelle suppose de rendre la complexité et l'hétérogénéité des réseaux de communication transparentes aux acteurs, au travers de solutions inter-opérables.

#### Objectifs

Les objectifs de NIIIP, orientés vers la standardisation des échanges dans l'entreprise virtuelle, sont plus particulièrement les suivants :

- définir et développer des extensions aux standards OMG (Object Management Group) afin d'aider au partage d'informations et à la collaboration dans les entreprises virtuelles,
- définir un cadre extensible et modulaire pour les interactions logicielles,
- définir des composants logiciels inter-opératoires réutilisables et portables basés sur des interfaces orientées objet standards,

---

<sup>25</sup> National Industrial Information Infrastructure Protocols (<http://www.niiip.org/>)

<sup>26</sup> Projet ESPRIT n°22.647 (<http://www.uninova.pt/~prodnet/>)

<sup>27</sup> Projet ESPRIT n°962219 (<http://centaurus.dee.fct.unl.pt/~massyve/>)

- développer des extensions aux standards de partage d'informations définis dans STEP, afin d'inclure de nouveaux protocoles pour le partage de bases de données, d'informations produits, etc,
- permettre l'échange (entre les différents membres des EV) d'informations relatives aux produits via des réseaux existant ou via le net,
- utiliser la technologie Workflow<sup>28</sup> afin de coordonner les tâches de conception et d'industrialisation à l'intérieur du réseau et capitaliser informatiquement les méthodes de développement de produits,
- établir des règles pour la sélection des participants, la définition de leurs responsabilités et de leur autorité à l'intérieur de l'EV via le service de gestion des connaissances.

### Résultats

En termes de résultats, le consortium NIIIP a développé une architecture de référence et un prototype support à la technologie de communication requise par les EV. Il a consolidé, harmonisé, intégré et étendu des protocoles de communication existants. Par le biais de scénarios d'EV industrielles, de projets pilotes et de démonstrations, NIIIP a démontré l'efficacité de l'approche proposée, qui permet de baser la technologie support aux EV sur des standards ouverts et des organisations visant à partager des informations et à coopérer efficacement.

#### 3.2.2 Le modèle PRODNET

Le projet PRODNET financé par l'Union Européenne, avait pour objectif la conception et le développement d'infrastructures pour le support d'entreprises virtuelles, et plus particulièrement de petites et moyennes entreprises [Camarinha-Matos, 1997]. Avant son intégration dans un réseau, chaque entreprise dispose d'un système de gestion des informations et de stratégies qui lui sont propres. Le coût induit par l'uniformisation des processus de gestion des informations produits /processus, par la mise en place de passerelles de communications avec l'extérieur compatibles avec l'Intranet, la création et la gestion de bases de données communes, des standards de communication appropriés, etc., absorberait les potentiels bénéfiques issus d'un partenariat. De ce fait, les travaux de PRODNET se sont centrés sur la coordination des activités des différentes unités et sur le développement des connexions inter-sites nécessaires.

L'infrastructure PRODNET comprend deux modules principaux :

- le module interne représente une unité autonome du réseau. Il couvre le système d'information interne à l'entreprise et toutes les décisions relatives à ses propres activités,
- le module de coopération assurant toutes les fonctionnalités de communication et de coordination requises pour une connexion effective et efficace d'un site au réseau global.

#### Le module interne

Le module interne PRODNET, conçu pour les petites et moyennes entreprises, inclut les fonctionnalités de gestion suivantes : la gestion logistique industrielle (gestion des OF, des données produits, des prévisions de ventes, et planification des besoins), l'ordonnancement de la production, le contrôle de la production, le contrôle qualité et la gestion des coûts.

Les principales adaptations au contexte étendu portent sur la gestion des OF (réception directe d'OF par le net) et la gestion des informations relatives à la qualité.

#### Le module de coopération PRODNET (Prodnet Cooperation Layer)

Ce module assure les fonctionnalités de communication inter-sites au moyen :

- d'un système de gestion des informations distribuées, responsable de l'ensemble des informations supports à la coopération,
- d'un module de coordination locale qui gère les interactions avec les modules des autres sites,
- d'un module EDI responsable de la réception et de la forme des messages relatifs aux OF au format EDIFACT,

---

<sup>28</sup> Un workflow est un ensemble de procédures automatisées qui permet de gérer des flux de données se présentant sous une forme numérique. <http://www.sacem.org/kiosque/1998/congres/tidiringier.html>

- d'un module STEP support aux données produits,
- d'une infrastructure de communication PRODNET responsable de la communication avec les autres nœuds du réseau,
- d'une interface configuration /utilisateur,
- de protocoles de communication internes et externes PRODNET.

### Résultats

Outre la définition des exigences et contraintes en matière de gestion et de partage des informations, de protocoles et mécanismes pour la coopération et la coordination, divers modèles ont émané du projet PRODNET. On peut citer l'approche multi-agent pour la supervision de la chaîne logistique, le modèle décrivant la gestion des situations survenant lors de la création et durant les phases opératoires des EV, ou encore le modèle d'aide à la décision à base de connaissances.

### 3.2.3 Le modèle MASSYVE

La complexité intrinsèque du problème d'ordonnancement, liée à la non-stationnarité des objectifs, fait que les contraintes temporelles (délais), technologiques (gammes) et de capacité des ressources sont loin d'être statiques et sont parfois même incertaines. La recherche d'une solution d'ordonnancement optimale dans ce contexte incertain n'est pas d'un grand intérêt, contrairement à la recherche d'ordonnements robustes et réactifs qui permettraient au système de fonctionner de manière fiable en dépit d'événements non planifiés.

Le projet MASSYVE est une initiative européenne, dont l'objectif est l'étude des systèmes multi-agent (SMA) pour l'ordonnancement agile (flexible et dynamique) et multi-site. Ce projet est basé sur l'intégration du SMA HOLOS<sup>29</sup> et du système de gestion des informations PEER décrit ci-après.

#### **Le système multi-agent HOLOS**

Les systèmes multi-agent représentent une approche prometteuse pour la construction de systèmes d'ordonnancement agile et multi-site, tirant parti de l'autonomie distribuée des agents, du fonctionnement temps réel asynchrone, de la flexibilité des mécanismes de contrôle, des capacités de communication des agents. Le SMA HOLOS a été conçu pour l'ordonnancement agile d'entreprises mono-site. Il est constitué d'un groupe d'agents dédiés à chaque atelier qui travaillent et échangent des informations sur des OF afin de générer, exécuter et superviser un ordonnancement.

Les agents du système HOLOS héritent des classes suivantes :

- un superviseur d'ordonnancement qui assure la supervision de l'ordonnancement dans sa globalité,
- des agents activité associés directement aux ressources, qui exécutent les OF,
- des centres de propagation locale, qui représentent le noyau fonctionnel des agents précédents,
- un consortium, instance temporaire créée pour superviser l'exécution d'un OF donné.

Parmi les difficultés qui peuvent intervenir durant la génération ou l'exécution d'un ordonnancement, on peut citer les problèmes temporels, les problèmes de capacité ou encore les conflits technologiques. Afin de pallier ces différents problèmes, le système HOLOS dispose de mécanismes de coordination assignant les tâches aux agents, utilisant des protocoles spécifiques pour l'échange d'informations et des méthodes de négociation pour la résolution des conflits durant les phases d'ordonnancement.

L'originalité du système HOLOS tient au fait qu'il n'y a pas un ordonnancement unique mais plutôt une collection d'ordonnements (un par OF) supervisée par l'agent consortium.

#### **Le système de gestion des informations PEER**

PEER est un système de gestion des informations orienté objet qui réalise le partage et l'échange d'informations entre des agents autonomes, coopérants et hétérogènes. L'ordonnancement agile

---

<sup>29</sup> [www.holos.com.br](http://www.holos.com.br)

nécessitant des informations durant sa génération et son exécution, certaines sont fournies par le MRP, d'autres par le PEER.

### Le projet MASSYVE

L'organisation hiérarchique de la planification, de l'ordonnancement et de l'exécution des activités a conduit à intégrer une fonction de supervision afin de vérifier l'adéquation entre les objectifs du plan et les résultats atteints. La planification de la production est caractérisée par l'existence de décisions décentralisées dont les systèmes supports sont distribués, autonomes et fortement coopératifs. L'intégration des deux systèmes PEER et HOLOS engendre un outil de communication entre des agents autonomes, à l'image des entreprises constitutives des entreprises étendues ou virtuelles, et constitue un modèle de référence pour l'ordonnancement agile de la production (Figure 2.7).

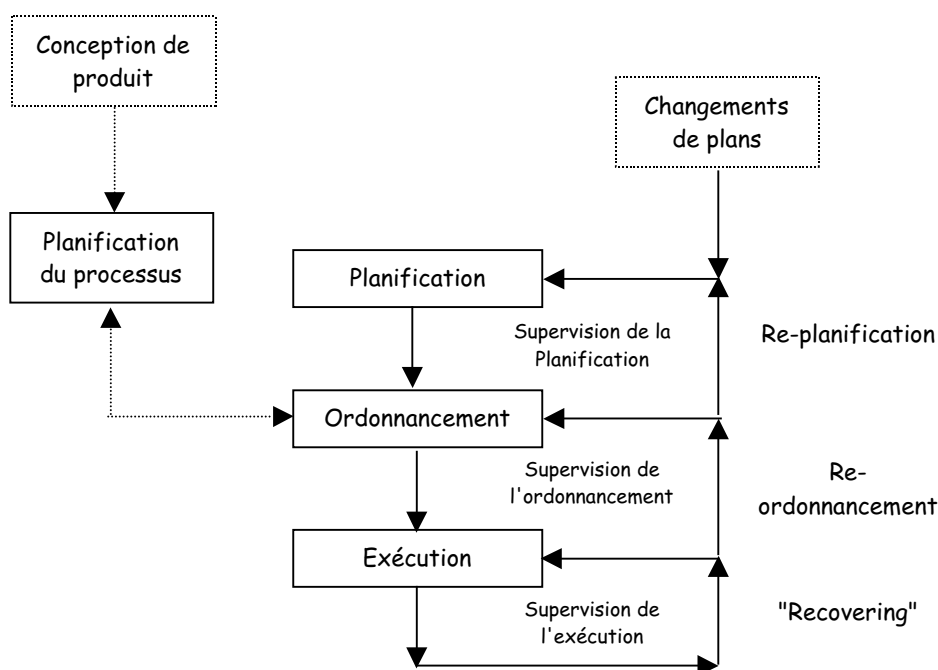


Figure 2.7 : Cadre pour l'ordonnancement agile (d'après [Rabelo, 1998])

### 3.2.4 Conclusion

Les architectures analysées sont basées sur l'interfaçage des différentes unités de production constitutives d'un partenariat d'entreprises, en définissant les mécanismes de coordination et les protocoles de communication. Leurs caractéristiques principales sont comparées dans le tableau 2.3.

Outre les infrastructures pour la communication et l'échange de données, les réseaux d'entreprises multi-site ont besoin d'outils pour les aider dans leur tâche de gestion. En effet, l'augmentation du nombre de fonctions à contrôler (achats, planification, etc.), de la fréquence à laquelle ces fonctions sont contrôlées, du nombre de facteurs à considérer avant de prendre une décision complexifie la conduite de ces systèmes.

On trouve ainsi un grand nombre d'applications complexes qui ne peuvent être abordées par les moyens informatiques actuels utilisant des approches algorithmiques classiques<sup>30</sup>. Les outils d'aide à la gestion de production combinant processus automatisés et aide à la décision humaine s'annoncent comme les solutions clés de ce nouvel environnement.

<sup>30</sup> on constate par exemple, dans le domaine de la production, que les progiciels de type ERP ou SCM largement utilisés par les firmes viennent enrichir le nombre de données non structurées dont les décideurs doivent tenir compte

		NIIP	PRODNET	MASSYVE
<b>Contexte</b>	Multi-sites	o	o	o
	Construction du réseau	o		
<b>Protocoles de communication</b>	Coordination	o	o	o
	Coopération	o	o	o
<b>Gestion des informations</b>	Base de données Commune	o	o	o
	Base de données Propre			o
<b>Echanges</b>	Echange données	o	o	o
	Echange produits			
<b>Planification</b>	Planification	o	o	o
	Ordonnancement		o	o
	Gestion logistique		o	
<b>SIAD</b>			o	o

Tableau 2.3 : Comparatif des architectures NIIP, PRODNET, MASSYVE

### 3.3 Les système d'aide à la Gestion de Production

#### 3.3.1 Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD)

La majeure partie des approches multi-site présentées ci-dessus s'inscrivent dans le champ plus global des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) pour la planification en univers complexe.

Différents types de systèmes d'aide, en fonction du degré de détail apporté à l'utilisateur, sont recensés dans la littérature [Alter, 1980], [Power, 2000]. Parmi les plus communément rencontrés, se trouvent en particulier :

- les systèmes d'aide à la modélisation de problèmes mal, semi, voire même non structurés,
- les systèmes d'aide à la résolution de problème,
- les systèmes supports à la coopération et à la coordination,
- les systèmes d'aide à la structuration du processus décisionnel.

Schneider classe, pour sa part, ces systèmes d'aide selon trois grands axes [Schneider, 1997] :

- les systèmes d'information et d'analyse d'information (systèmes de documentation, bases de données, analyse de données, simulations, certains systèmes expert, etc.),
- les systèmes d'aide à la prise de décision (systèmes expert, logiciels de support de choix dans le cadre de problèmes multi-attributs, etc.),
- les systèmes de communication et de coopération (systèmes de travail coopératif à distance, systèmes de négociation, etc.),

Certains de ces systèmes sont très spécialisés, tandis que d'autres tentent de combiner ces trois axes. Il existe ainsi des systèmes d'aide à la décision à bases de cas ("Case-Based") qui permettent un raisonnement par analogie [Angerhn, 1992], [Moudden, 1997], les "group decision support systems" (GDSS) ou "multi-participant decision support systems" (MDSS) [Zuurbier, 1992].

Bien qu'il existe plusieurs taxonomies, tous les auteurs accordent aux SIAD les caractéristiques suivantes : ces systèmes sont conçus spécifiquement afin de faciliter et de sécuriser un processus de décision et non

de l'automatiser. Ils doivent en outre être capables de répondre rapidement aux besoins changeants des décideurs. L'avantage de ces outils est qu'ils ne donnent pas une solution unique à un problème mais fournissent généralement un ensemble de solutions admissibles parmi lesquelles un ou plusieurs utilisateurs vont devoir choisir, laissant ainsi du champ à l'expertise humaine.

Ainsi, dans le cas de l'aide à la décision en conduite, domaine qui nous concerne plus particulièrement, les méthodes issues de l'Intelligence Artificielle permettent de caractériser un ensemble de solutions admissibles. D'autres méthodes utilisant des heuristiques fournissent des séquences de groupes d'opérations permutable.

### 3.3.2 L'aide à la décision en production

Les systèmes d'aide à la décision en Gestion de Production font référence à un ensemble varié d'outils informatiques assistant directement ou indirectement la décision voire le travail général du gestionnaire. Ils permettent au décideur individuel et à l'organisation environnante de mieux gérer la masse et la complexité de l'information et, a contrario, aux organisations de mieux coordonner l'activité des décideurs individuels en structurant, traitant et sécurisant les données à transmettre aux décideurs. Leur conception et leur implémentation requièrent une analyse approfondie de l'environnement décisionnel.

Les principales attentes des utilisateurs d'un SIAD sont :

- d'améliorer l'efficacité des décisions humaines de l'entreprise,
- d'accélérer la résolution des problèmes et d'améliorer la qualité des décisions,
- de faciliter la communication entre les personnes,
- de faciliter l'apprentissage de la décision,
- d'augmenter le contrôle organisationnel,
- de disposer de l'information juste nécessaire et suffisante (précise, pertinente et complète), au bon moment, dans le bon format.

Les données utilisées peuvent avoir des caractéristiques différentes (degré d'agrégation, fréquence de rafraîchissement, ...), et sont fournies aux décideurs par l'intermédiaire d'interfaces interactives appelées **tableaux de bord** (cf. chapitre 5 §2.1).

En dépit de leurs nombreux avantages, le recours aux SIAD n'est pourtant pas sans poser de problèmes. En effet, un SIAD est sensible à la fiabilité des données disponibles, aux coûts induits par la capitalisation, le traitement, le sauvegarde et la distribution de l'information. Une autre difficulté est qu'à un certain niveau d'analyse, la décision est tributaire de plusieurs critères antagonistes. Il en résulte des problèmes d'agrégation des critères. Toutefois, les difficultés liées à leur élaboration neutralisées, les SIAD sont les outils les plus utilisés pour gérer la multitude de données et informations avec lesquelles tout décideur doit composer.

Les SIAD trouvent de plus en plus de débouchés dans le domaine de la production au sens large. On peut citer parmi ceux-ci :

- la simulation de placement d'OF sur des ressources à capacité finie (cas de IO [Bérard, 1998]),
- les systèmes d'aide à la conception de processus de fabrication (IPPA [Chep, 1999]),
- les systèmes d'aide à la décision pour l'optimisation de réseaux logistiques (SC Studio<sup>31</sup>),
- les systèmes d'aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources,
- les systèmes d'aide au pilotage en temps réel d'atelier (ORDO, [Billaut, 1993]).

A titre d'exemple, l'outil d'ordonnancement et de pilotage en temps réel d'atelier ORDO développé par le LAAS de Toulouse met en évidence un ensemble de solutions compatibles avec les principales contraintes du problème d'ordonnancement, et permet de décentraliser les décisions au niveau des opérateurs. A chaque fois qu'une information est saisie, d'autres informations fournies au décideur (comme les états des opérations, des ressources, les groupes en cours d'exécution, les marges,...) sont automatiquement mises à jour), permettant de réactualiser le planning et d'évaluer l'impact d'aléas [Artigues, 1997].

---

<sup>31</sup> <http://www.ulaval.ca/vrr/rech/Proj/72059.html>



### 3.4 CONCLUSION

La planification et le suivi de la production dans un environnement multi-site est un problème très actuel, résultant des organisations nouvelles de production qu'autorisent les techniques d'échanges de données électroniques (EDI) et la vulgarisation d'Internet. L'analyse des approches de PMS et des architectures de référence nous amène à dresser le constat suivant :

- La résolution du problème de gestion de production multi-site est conditionnée par la résolution de deux sous-problèmes étroitement imbriqués :
  - le premier concerne la planification et l'ordonnement de la production et des transports proprement dits, problèmes loin d'être solutionnés et qui nécessitent, dans un environnement étendu, de disposer d'informations fiables et en temps réel sur l'état courant des différents partenaires du réseau d'entreprises,
  - le second concerne la communication inter-entreprises, la coordination et la coopération des différents acteurs, ainsi que la mise en adéquation de leurs objectifs.
- Le nombre de données techniques à considérer en PMS justifie des outils d'assistance permettant aux experts de se concentrer sur les décisions à fort enjeu économique ou stratégique.

Compte tenu de la rapidité d'évolution du contexte de production et, de fait, des stratégies d'entreprise, la tendance est de faire interagir les décideurs avec un système d'information et d'aide à la décision afin d'alléger la tâche de chacun. Dans ce contexte, les systèmes d'aide à la décision s'imposent comme une clé de ces nouvelles orientations.



## Conclusion de la partie 1

La première partie de ce mémoire s'est attachée à décrire l'incidence des nouvelles organisations industrielles sur la problématique de *Gestion de Production*. Cette introduction a permis :

- de situer le contexte de production moderne, tant d'un point de vue organisationnel que socio-économique,
- de montrer la nécessité de disposer d'outils de gestion efficaces pour les entreprises en réseaux, afin d'assurer la compétitivité de l'ensemble et de préserver l'intérêt de chacun des acteurs de la chaîne logistique,
- de positionner le problème de la *Gestion de Production Multi-site* par rapport au problème de *Gestion de Production mono-site*,
- d'insister sur la nécessité de disposer de systèmes d'assistance à la décision humaine, même s'il est clair que la qualité de la décision dépend in fine de la capacité du décideur à en maîtriser les enjeux. Les SIAD s'avèrent constituer des outils nécessaires à la compréhension du cadre de décision, mais bien entendu non suffisants. Ce sera l'une des préoccupations de notre proposition que de formaliser les données et les latitudes de la décision en planification/ordonnancement, tout en laissant les espaces nécessaires à l'expression de l'expertise humaine.

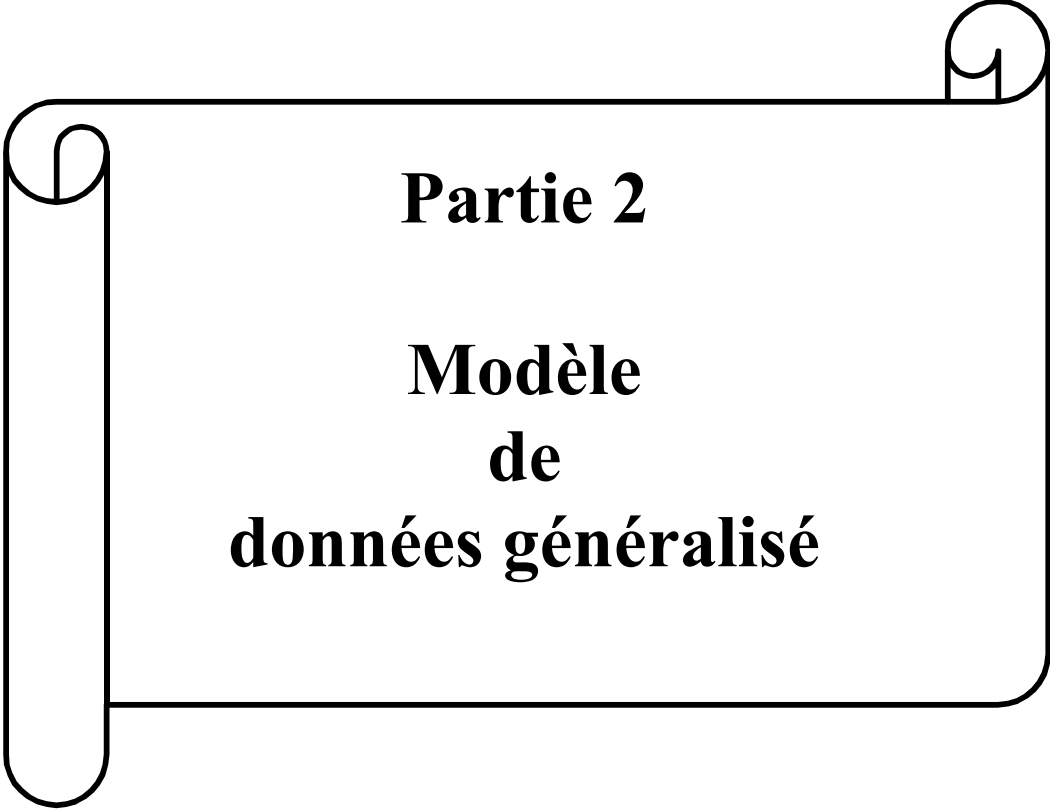
La gestion de la chaîne logistique et l'intégration des fonctions de l'entreprise au travers d'outils d'aide à la décision s'imposent comme de nouveaux impératifs pour la *Gestion de Production*.

Bien que de nombreux progiciels de type ERP ou SCM aient vu le jour ces dernières années, aucun ne semble aujourd'hui à même d'unifier la problématique de production ni d'offrir un cadre universel pour le raisonnement expert. Au niveau théorique, on s'aperçoit qu'il n'existe que peu de travaux traitant de la problématique de *Gestion de Production* étendue aux réseaux d'entreprise. Les travaux traitent soit du problème de définition de protocoles de communication pour la coordination et la coopération, soit du problème de gestion multi-site proprement dit.

Les travaux sur la gestion de production répartie sont plutôt motivés par la recherche d'une politique optimale au sens d'un critère prédéfini. Nous nous en démarquerons par une contribution délibérément orientée vers l'aide à la décision laissant le champ libre à l'expression des politiques de décision proprement dites. L'objet de nos travaux de recherche est de jeter les bases d'un outil de type APS, qui loin de chercher à automatiser le processus décisionnel, offrirait à un décideur l'ensemble de tous les scénarios de planification multi-site admissibles. Dans ce contexte, nous proposons un modèle de données permettant de prendre en compte de façon explicite et générique les contraintes liées à la présence de sous-traitants, clients, fournisseurs et donneurs d'ordres environnant une entreprise donnée dans un réseau, en vue d'assurer une *Gestion de Production* (gestion conjointe des stocks, des transports et des activités de transformation) globale et cohérente.



---



# **Partie 2**

## **Modèle de données généralisé**

### Résumé

Cette partie présente notre contribution à la conduite des systèmes réticulaires de production, et vise à fournir à tout décideur un cadre lui permettant de délimiter son espace de liberté décisionnelle. Nos travaux s'appuient sur l'architecture de conduite multi-niveau de production proposée par Zolghadri [Zolghadri, 1998], que nous généralisons afin de prendre en compte le caractère distribué de la décision.

Un modèle générique de données instanciable à chaque centre de conduite est proposé, ainsi qu'un assortiment de règles de cohérence permettant d'attester, d'une part, de la cohérence du scénario d'allocation proposé, et, d'autre part, de la cohérence de la désagrégation et de la répartition des données entre centres de conduite impliqués dans des relations hiérarchiques et/ou de coopération. La structure de données générique proposée est transposable à tout centre de conduite quel que soit son niveau et à tout système de production quelles que soient ses relations avec son environnement (relations client/fournisseur, donneur d'ordres/sous-traitant, supervision).



---

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION À LA PARTIE 2</b> .....	<b>61</b>
<b>CHAPITRE 3 : ARCHITECTURE DE PLANIFICATION MULTI-NIVEAU DES</b> .....	<b>63</b>
<b>SYSTÈMES RÉTICULAIRES DE PRODUCTION</b> .....	<b>63</b>
<b>1 LES PRESTATAIRES D'UNE ENTREPRISE</b> .....	<b>63</b>
1.1 L'EXTERNALISATION DES ACTIVITÉS OU OUTSOURCING .....	63
1.1.1 <i>La sous-traitance</i> .....	63
1.1.2 <i>Les différents types de sous-traitance industrielle</i> .....	64
1.2 L'ACHAT DE FOURNITURES .....	64
1.2.1 <i>L'achat</i> .....	64
1.2.2 <i>Les différents types d'achat</i> .....	64
1.3 LES RELATIONS INTER-ENTREPRISES .....	65
<b>2 LA MODELISATION D'ENTREPRISE</b> .....	<b>65</b>
2.1 LE MODÈLE GRAI EN TANT QU'OUTIL DE MODÉLISATION D'ENTREPRISE .....	66
2.1.1 <i>Décomposition du système physique</i> .....	66
2.1.2 <i>Décomposition du système décisionnel</i> .....	66
2.1.3 <i>Décomposition du système d'information</i> .....	67
2.2 LE CENTRE DE CONDUITE .....	67
2.2.1 <i>Les attributs du centre de conduite</i> .....	67
Les objectifs .....	67
Les contraintes .....	67
Les variables de décision .....	68
Les critères .....	68
2.2.2 <i>Les paramètres et variables du centre de conduite</i> .....	68
Le modèle de décision .....	68
Les informations et données de la décision .....	69
Agrégation des données et prise de décision .....	69
2.3 LES INTERRELATIONS ENTRE CENTRES DE CONDUITE .....	70
2.3.1 <i>Les relations hiérarchiques</i> .....	70
2.3.2 <i>Les relations de coopération</i> .....	70
2.4 LES INTERFACES DES CENTRES DE CONDUITE .....	71
2.4.1 <i>La distinction Produits / Transformations</i> .....	71
Nature des relations entre acteurs .....	71
Flux poussés, flux tirés .....	71
La relation produit/travail/processus .....	72
2.4.2 <i>Les interfaces génériques d'un centre de décision</i> .....	72
<b>3 CONCEPT DE CONDUITE HIERARCHISÉE</b> .....	<b>73</b>
3.1 ARCHITECTURE DE CONDUITE HIÉRARCHISÉE .....	73
3.2 ARCHITECTURE DE CONDUITE GÉNÉRALISÉE .....	74
3.3 FONCTIONNEMENT DE L'ARCHITECTURE DE CONDUITE GÉNÉRALISÉE .....	75
3.3.1 <i>Processus de conduite généralisé</i> .....	75
3.3.2 <i>Activités décisionnelles d'un centre de conduite</i> .....	75
3.3.3 <i>Objectifs de modélisation</i> .....	77
3.3.4 <i>Données et contraintes du processus de conduite</i> .....	77
<b>4 CONCLUSION</b> .....	<b>77</b>
<b>CHAPITRE 4 : UN MODÈLE GÉNÉRALISÉ POUR LE CALCUL BESOIN/CHARGE</b> .....	<b>79</b>
<b>1 CALCUL DE BESOIN / CALCUL DE CHARGE</b> .....	<b>81</b>
1.1 LES BESOINS NETS : PHASE 1 .....	81
1.1.1 <i>Le calcul des besoins bruts</i> .....	81

1.1.2	<i>La gestion des stocks</i> .....	81
1.1.3	<i>Le calcul des besoins nets</i> .....	82
1.2	LE CALCUL DE CHARGE : PHASE 2 .....	82
1.3	LES APPROVISIONNEMENTS : PHASE 3 .....	82
<b>2</b>	<b>MODÈLE ALGÈBRE DE PRODUCTION</b> .....	<b>83</b>
2.1	MODÉLISATION DES PROCESSUS DE TRANSFORMATION .....	83
2.2	EQUATION DE PRODUCTION GÉNÉRALISÉE .....	84
<b>3</b>	<b>MODÈLE ALGÈBRE DU CADRE DE DÉCISION</b> .....	<b>84</b>
3.1	PROBLÉMATIQUE D'INVERSION .....	84
3.2	CONTRAINTES SUR LES VARIABLES .....	85
3.2.1	<i>Les contraintes logiques</i> .....	85
3.2.2	<i>Les contraintes physiques et de gestion</i> .....	85
3.3	MODÈLE INVERSE DE PRODUCTION .....	85
3.3.1	<i>Résolution par la méthode de la pseudo-inverse</i> .....	85
	Principe de résolution .....	85
	Calcul de charge .....	86
	Calcul de besoin .....	86
	Conditions d'inversibilité et espace des solutions .....	86
	Conclusion .....	89
3.4	PROBLÉMATIQUE D'OPTIMISATION .....	90
3.4.1	<i>Contraintes</i> .....	90
	Contraintes égalité .....	90
	Contraintes inégalité .....	90
3.4.2	<i>Critère d'optimisation générique</i> .....	90
3.4.3	<i>Approches d'optimisation</i> .....	91
	Programmation linéaire .....	91
	Les procédures par séparation et évaluation progressive .....	91
3.4.4	<i>Conclusion sur les approches d'optimisation</i> .....	92
<b>4</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>92</b>
<b>CHAPITRE 5 : ALLOCATION DE CHARGE</b> .....		<b>95</b>
<b>1</b>	<b>MODÉLISATION DES RESSOURCES</b> .....	<b>96</b>
1.1	DÉFINITION DES RESSOURCES .....	96
1.2	CARACTÉRISATION DES RESSOURCES DE TRANSFORMATION .....	97
1.2.1	<i>Principes de modélisation</i> .....	97
1.2.2	<i>Caractérisation d'une ressource virtuelle de transformation</i> .....	97
	Ressource de transformation à charges indépendantes .....	98
	Ressource de transformation à charges couplées .....	98
1.2.3	<i>Délai opératoire</i> .....	100
	Ressource de transformation à charges indépendantes .....	100
	Ressource de transformation à charges couplées .....	101
1.3	CARACTÉRISATION DES RESSOURCES DE TRANSPORT .....	101
1.3.1	<i>Principes de modélisation</i> .....	101
1.3.2	<i>Caractérisation d'une ressource virtuelle de transport</i> .....	102
	Ressource de transport à charges indépendantes .....	102
	Ressources de transport à charges couplées .....	102
1.3.3	<i>Délai de transport</i> .....	103
	Ressource de transport à charges indépendantes .....	103
	Ressources de transformation à charges couplées .....	103
<b>2</b>	<b>ALLOCATION COHERENTE DE CHARGE</b> .....	<b>103</b>
2.1	LES TABLEAUX DE BORD .....	104
2.2	TABLE D'ALLOCATION .....	104
2.3	EQUATION GÉNÉRALISÉE DES STOCKS .....	105



---

2.4	RÈGLES DE COHÉRENCE .....	106
2.4.1	<i>Synchronisation logistique/production</i> .....	106
2.4.2	<i>Contraintes sur les stocks</i> .....	106
	Contrainte de stock minimal en début de période.....	106
	Contrainte de stock maximal en fin de période .....	106
2.4.3	<i>Couverture des travaux</i> .....	106
2.4.4	<i>Contraintes de précédence entre travaux</i> .....	107
2.4.5	<i>Respect des capacités des ressources</i> .....	108
3	CONCLUSION .....	108
<b>CHAPITRE 6 : RÉCURSIVITÉ DU MODÈLE DE DONNÉES</b> .....		<b>111</b>
1	<b>L'INTEGRATION VERTICALE DES MODELES DE DONNÉES</b> .....	<b>113</b>
1.1	INTRODUCTION .....	113
1.1.1	<i>La désagrégation des ressources</i> .....	113
1.1.2	<i>La désagrégation des objets</i> .....	113
1.1.3	<i>La désagrégation des transformations</i> .....	113
1.1.4	<i>La désagrégation du temps</i> .....	114
1.2	MODÈLE DE DÉSAGRÉGATION DES PROCESSUS .....	114
1.2.1	<i>Désagrégation des objets</i> .....	115
1.2.2	<i>Désagrégation des travaux</i> .....	116
1.2.3	<i>Cohérence inter-niveau</i> .....	116
1.2.4	<i>Conclusion</i> .....	119
2	<b>L'INTEGRATION HORIZONTALE DES MODELES DE DONNÉES</b> .....	<b>120</b>
2.1	INTÉGRATION DES MODÈLES DE DONNÉES DE DEUX CENTRES DE CONDUITE.....	120
2.1.1	<i>Association de processus locaux</i> .....	120
2.1.2	<i>Intégration</i> .....	122
2.2	GÉNÉRALISATION.....	123
2.2.1	<i>Cohérence statique</i> .....	123
2.2.2	<i>Cohérence dynamique</i> .....	124
2.3	CONCLUSION.....	125
3	CONCLUSION .....	125
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 2</b> .....		<b>131</b>



## Introduction à la partie 2

Au regard des différentes approches de résolution des problèmes de planification et ordonnancement de la production, nous formulons ici les observations qui nous amènent à définir le cadre de notre travail.

- L'augmentation du nombre de données due à la complexification des produits à fabriquer et à l'émergence d'organisations réticulaires de production impose une décomposition en plusieurs étapes du processus décisionnel, souvent qualifiée de hiérarchique ou multi-niveau.
- Le développement des structures réticulaires de production engendre une problématique de conduite nouvelle, portant sur la coordination globale d'un système distribué et ses rapports avec les structures locales de pilotage.
- Il est nécessaire de formuler les liens existant entre les fonctions de planification et ordonnancement de la production, sans lesquels les différents segments de la Gestion de Production ne sauraient s'articuler dans un système décisionnel cohérent. L'intégration de ces deux fonctions clé de la Gestion de Production dans un raisonnement global et dans une structure multi-niveau devrait permettre de pallier l'insuffisance de solutions localement optimales.
- Les approches multi-niveau se limitent souvent à deux niveaux, l'un traitant de la planification grossière des charges, l'autre de l'ordonnancement fin mettant en scène machines, pièces et opérations détaillées. Le problème ainsi posé rencontre de grandes difficultés théoriques et s'accommode assez mal des contraintes d'utilisation (notamment quant à la dimension combinatoire du problème).
- La complexité de la Gestion de Production manufacturière oblige à recourir largement à l'expertise humaine et à la décomposition du problème de décision en sous-problèmes de complexité raisonnable. Ce constat unanime oriente aujourd'hui les investigations d'une part vers une structuration multi-niveau du système d'exploitation des ressources productives, d'autre part vers l'interactivité entre décision humaine et décision algorithmique.
- La proposition d'outils basés sur l'analyse sous contrainte et la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire relativement à un critère prédéfini paraît inopportune en raison de la variabilité de l'environnement de production actuel. La proposition d'un outil permettant de délimiter l'ensemble des solutions faisables au problème du décideur se révèle à notre avis plus appropriée.

Notre contribution prend la forme d'un modèle de données unifié cadrant la décision experte en planification/ordonnancement adapté au contexte des organisations réticulaires et au raisonnement multi-niveau. L'objectif n'est donc pas de modéliser la décision elle-même mais de délimiter l'espace des décisions possibles dans lequel le décideur effectuera en dernier ressort son choix, selon des critères propres.

Le chapitre 3 est dédié à la proposition d'une architecture de conduite multi-niveau. Cette unique architecture pouvant être transposée à tout système de production, nous identifierons un centre de décision générique et ses interfaces intra et inter-entreprises. Le processus décisionnel de ce centre sera ensuite présenté dans sa globalité. Celui-ci se compose de deux sous-activités indissociables.

- la première consiste en un calcul de besoin et de charge (chapitre 4), visant à évaluer la part de travail que la ressource pilotée doit effectuer et la part d'objets (matières premières, produits semi-finis, produits finis) que le centre de décision doit approvisionner afin de réaliser son carnet de commandes. Des politiques de régulation des stocks (cibles de production, stocks de sécurité, ...) pourront être intégrées lors de ce calcul.

- la seconde procède à l'allocation des différents travaux aux ressources de production accessibles (chapitre 5). Les contraintes liées au transport seront prises en compte dans un second temps, de sorte à considérer simultanément les contraintes logistiques.

L'idée sous-jacente est que des phases du processus décisionnel sont déterministes, d'autres phases laissant au contraire un champ d'expression aux stratégies de pilotage. Notre travail s'est attaché à formaliser les phases déterministes et à établir des règles de cohérence permettant la vérification a posteriori de la cohérence des arbitrages rendus durant les phases de véritable décision.

La prise de décision pour la conduite des systèmes de production s'effectue au travers d'un réseau de centres de conduite. Elle revêt donc un caractère local du fait des choix qui doivent être effectués par chaque centre et un caractère distribué devant prendre en compte les interactions mutuelles des centres de conduite. Ce faisant, afin de garantir la cohérence globale de la structure de conduite, il faut pouvoir vérifier la continuité des données de chaque centre de conduite eu égard aux centres environnants. Nous présenterons, au chapitre 6, les primitives permettant de garantir la cohérence de la désagrégation et de la répartition des données entre plusieurs centres de conduite. L'objectif est d'établir des passerelles génériques pour l'échange de données entre les différents centres de conduite, en dépit du caractère spécifique des données localement manipulées (gammes, nomenclatures).

## Chapitre 3

# Architecture de planification multi-niveau des systèmes réticulaires de production

### 1 LES PRESTATAIRES D'UNE ENTREPRISE

L'idée de base des réseaux d'entreprises repose sur le fait qu'une organisation n'a pas toujours intérêt à tout réaliser elle-même et peut tirer parti d'une coopération avec d'autres. Assimilée à un nœud au sein d'un réseau de partenariat, une entreprise se voit offrir trois possibilités :

- soit externaliser une part de ses activités :
  - offrant peu de valeur ajoutée,
  - non sensibles quant à la prestation au client,
  - qui peuvent être réalisées mieux ou moins cher à l'extérieur,
  - qui immobilisent des ressources financières ou temps qui pourraient être mieux utilisées ailleurs,
  - qu'elle n'a momentanément pas la capacité d'exécuter,
  - pour lesquelles elle ne dispose pas des compétences requises.
- soit acheter des sous-ensembles :
  - qu'elle n'a pas les moyens techniques ou financiers de réaliser,
  - qui peuvent être réalisés mieux ou moins cher à l'extérieur,
  - qui généreraient des coûts de stockage trop importants,
  - etc.
- soit, le cas échéant, réaliser dans la totalité ce qui lui a été commandé.

#### 1.1 L'externalisation des activités ou outsourcing

Il existe différents types d'externalisation, fonction du degré de contrôle que l'entreprise principale souhaite garder sur le travail réalisé par ses partenaires et du degré de responsabilité de ceux-ci. Sont distingués la sous-traitance, le partenariat, la fonction externalisée, les organisations virtuelles et les processus virtuels [Bloch, 2000]. Parmi ces formes d'externalisation, nous nous intéressons au cas le plus fréquemment rencontré en production : la sous-traitance.

##### 1.1.1 La sous-traitance

Trois types de sous-traitance ont été identifiés [Capet, 1996] : la sous-traitance de marché, la sous-traitance de service et la sous-traitance industrielle qui nous intéresse plus spécialement dans le cadre de nos travaux.

Selon la norme AFNOR, "**peuvent être considérées comme activités de sous-traitance industrielle, toutes les opérations concourant, pour un cycle de production déterminé, à l'une ou plusieurs des opérations de conception, d'élaboration, de fabrication, de mise en œuvre ou de maintenance du produit en cause, dont une entreprise dite donneur d'ordres, confie sa réalisation à une entreprise, dite sous-traitant ou preneur d'ordres, tenue de se conformer exactement aux directives ou spécifications techniques arrêtées en dernier ressort par le donneur d'ordres**" [AFNOR, 1987].

Les acteurs mis en jeu sont le donneur d'ordres et le sous-traitant. Le **donneur d'ordres** désigne "l'entreprise ayant la responsabilité de la réalisation du produit (maître d'ouvrage ou maître d'œuvre)". Le **sous-traitant** est défini comme la "personne qui est chargée d'un travail pour le compte et selon les directives d'un entrepreneur principal (donneur d'ordres)".

### 1.1.2 Les différents types de sous-traitance industrielle

La sous-traitance de fonction : **"opération /.../ portant sur la réalisation d'un sous-ensemble remplissant une fonction précise dans tout ou partie du produit considéré."** [AFNOR, 1987]

La sous-traitance de capacité : **"lorsque l'entreprise donneur d'ordres, équipée elle-même pour exécuter un produit, a recours à une autre entreprise soit occasionnellement, en raison d'une pointe momentanée dans sa production ou d'un incident technique, soit de façon plus ou moins habituelle parce que, désireuse de conserver une capacité propre dans une fabrication donnée, elle entend utiliser des capacités de production disponibles à l'extérieur."** [AFNOR, 1987]

La sous-traitance de spécialité : **"dès lors que l'entreprise donneur d'ordres décide de faire appel à un spécialiste disposant des équipements et de la compétence adaptée à ses besoins, parce qu'elle ne peut ou ne souhaite pas pour des raisons relevant de sa stratégie propre, se doter des moyens nécessaires au lancement ou au développement d'une fabrication, ou encore parce qu'elle estime ses installations insuffisantes ou insuffisamment compétitives pour cette fabrication."** [AFNOR, 1987]

Le façonnage : **"correspond à l'exécution par une entreprise, pour le compte d'une entreprise donneur d'ordres, de certaines opérations sur des matières ou des produits semi-finis, fournis par cette entreprise donneur d'ordres."** [AFNOR, 1987]

## 1.2 L'achat de fournitures

### 1.2.1 L'achat

S'agissant de s'approvisionner en composants, une entreprise cliente s'adresse à des fournisseurs. Le fournisseur peut être un producteur, un importateur, un assembleur, ou une société de services. La commande est libellée en produits, c'est-à-dire en quantités déterminées de produits éventuellement diversifiés, assorties d'échéances. Il convient de noter que seul le respect (contractuel) de la qualité, du délai et des prix importe ici au client, lequel n'est en définitif demandeur que de *résultats* le concernant :

- le respect de la qualité implique la maîtrise d'un processus amont de fabrication qui incombe au seul fournisseur et demeure généralement invisible au client. A l'extrême, le fournisseur peut, sans opérer de transformation physique, satisfaire l'exigence de qualité requise par le client en recourant au négoce. En d'autres termes, le produit est le résultat d'une transformation physique qui en tant que telle importe peu au client.
- le respect des délais, de manière analogue, est la projection individualisée (eu égard au client considéré) d'une performance globale de gestion des activités du fournisseur. Ces activités vont croissant avec la longueur des processus de transformation et le nombre de clients à satisfaire. En d'autres termes, le délai de réponse au client est le résultat d'une charge de travail du fournisseur qui, ici encore, importe peu au client.
- enfin, et même si la dimension économique n'est pas explicitement intégrée dans notre analyse, il est clair que le prix offert au client est la projection individualisée d'un ensemble de coûts économiques et d'une politique commerciale non rendus visibles au client.

### 1.2.2 Les différents types d'achat

L'achat de produits et l'approvisionnements permettent d'assurer la **"fourniture des produits (articles, matières premières, sous-ensembles, etc.) nécessaires à la production, en gérant les niveaux de stocks de ces produits"** [Doumeingts, 1994].

L'achat de capacité est un engagement à moyen ou à long terme auprès d'un fournisseur ou d'un sous-traitant par lequel on réserve une partie de ses ressources (main d'œuvre ou machine) en vue d'une production qui sera précisée lors de commandes ultérieures.

### 1.3 Les relations inter-entreprises

Selon les définitions précédentes, une entreprise peut être impliquée dans différents types de relations selon l'échange et le contrôle qu'elle exerce sur ses partenaires. Dans le champ de nos travaux, nous synthétisons ces définitions de la façon suivante :

- nous parlerons de sous-traitance dès lors que **"l'objet de la coopération entre deux protagonistes concerne la réalisation d'une transformation. Les acteurs mis en cause sont le donneur d'ordres et le sous-traitant"**. Dans ce type de relation, le sous-traitant se conforme aux directives ou spécifications de réalisation du donneur d'ordres, ce dernier s'engageant à fournir les entrants nécessaires à la réalisation de l'activité demandée (Figure 3.1a).

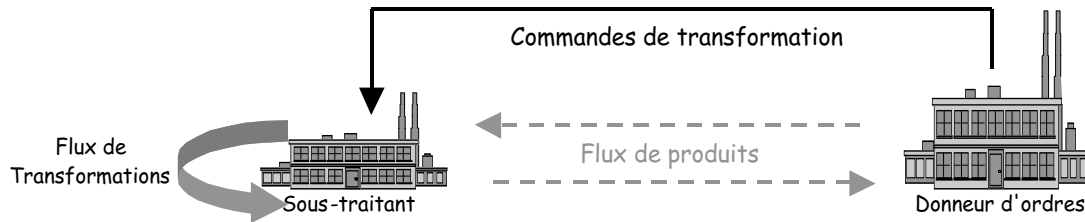


Figure 3.1a - Relation Donneur d'ordres - Sous traitant

- nous parlerons d'achat lorsque **"l'objet de la coopération entre deux protagonistes concerne l'achat de matières premières, produits semi-finis ou finis. Les acteurs mis en cause sont le fournisseur et le client"**. Dans ce type de relation, aucune spécification ou directive de transformation n'est émise par le client. Le fournisseur s'engage à livrer les produits demandés au coût, niveau de qualité et à la date demandée (Figure 3.1b).



Figure 3.1b - Relation client-fournisseur

Nous résumons l'environnement d'une entreprise X de la façon suivante (Figure 4.1c) :

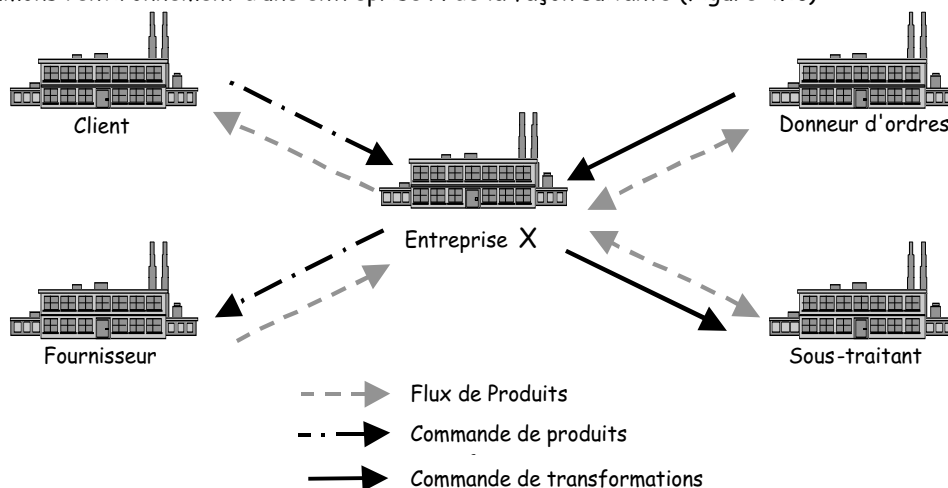


Figure 3.1c : Relations inter-entreprise

## 2 LA MODELISATION D'ENTREPRISE

Notre objectif étant d'étendre la problématique de la Gestion de Production au cas des systèmes distribués de production et notamment au cas des réseaux d'entreprises (Gestion de Production multi-

site), nous ne prendrons pas parti sur l'art de concevoir ces systèmes et nous placerons délibérément dans une problématique d'analyse et de modélisation de systèmes prédéterminés. Nous partirons, en tant que cadre général d'analyse, du modèle de référence GRAI.

## 2.1 Le modèle GRAI en tant qu'outil de modélisation d'entreprise

Le modèle GRAI [Doumeingts, 1994] met en évidence une décomposition hiérarchisée et répartie de l'ensemble du système de production (Figure 3.2). Ce dernier est décomposé en sous-systèmes de moindre complexité, sur la base de critères fonctionnels, temporels et spatiaux.

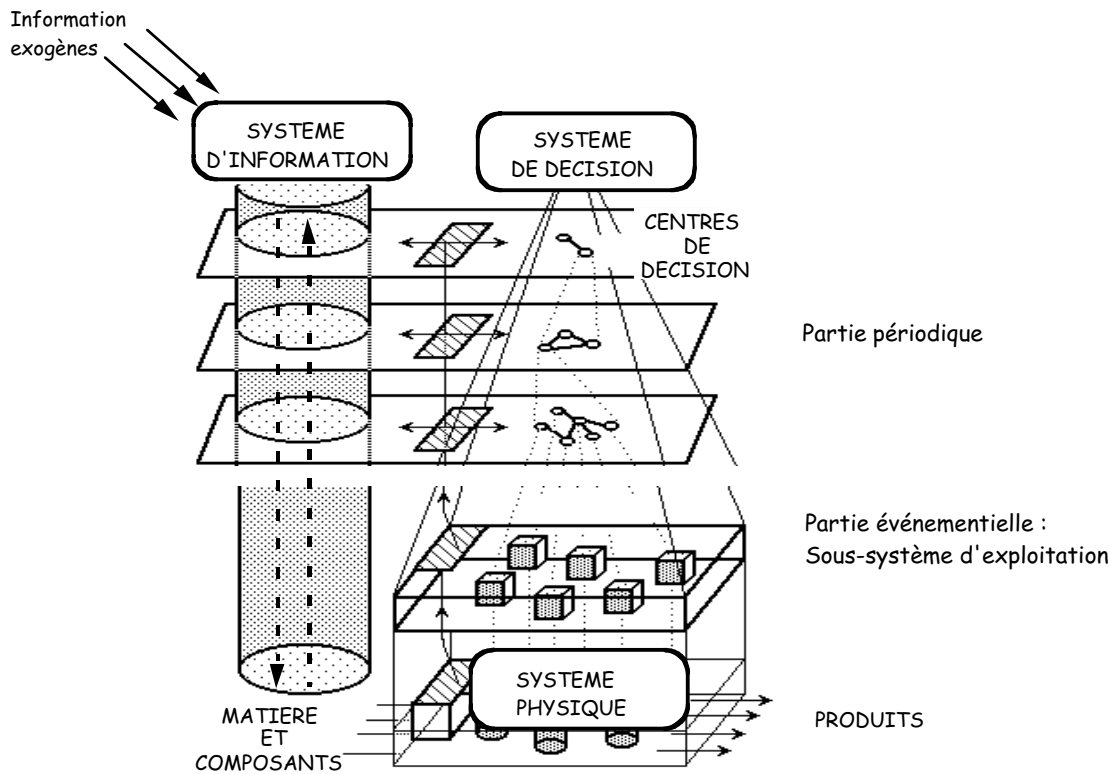


Figure 3.2 : Le modèle de référence GRAI [Doumeingts, 1994]

### 2.1.1 Décomposition du système physique

D'un point de vue physique, le système de production est décomposé sur la base d'un critère spatial (décomposition d'une firme en ateliers, cellules, machines) qui se trouve être également, le plus souvent, un critère fonctionnel : ces sous-systèmes de production ont à charge la fabrication de sous-ensembles de produits. Au sens générique, une ressource est une unité de production, vue en tant que telle au travers d'une représentation externe ou "agrégée". Cette ressource est, dans une représentation interne, décomposable en sous-ressources, et ce récursivement, selon une arborescence dont les feuilles terminales sont soit les moyens élémentaires de production (ressources réelles : machines, opérateurs humains), soit des moyens agrégés (ressources virtuelles), dont le détail est inutile au raisonnement de gestion. La décomposition du système physique par une cascade de vues externes et internes de ressources de taille décroissante est un principe de représentation structurée de tout système complexe de production, à notre avis seul à même de faire face à la complexité du système tout en préservant la sémantique des choix organisationnels qui ont prévalu lors de la conception du système.

### 2.1.2 Décomposition du système décisionnel

D'un point de vue décisionnel, la structure est à la fois hiérarchisée et répartie afin de permettre la coordination locale et globale des activités des différentes entités composant le système. Deux critères de



décomposition sont utilisés dans le modèle GRAI : fonctionnel (fonctions de la Gestion de Production) et temporel (niveaux décisionnels).

Cette décomposition matricielle du système décisionnel, caractéristique des grilles GRAI, permet d'identifier et caractériser les *centres de décision GRAI*, dont le rôle est d'assurer une fonction déterminée à un niveau donné.

### 2.1.3 Décomposition du système d'information

Le système d'information doit également être hiérarchisé en rapport avec la décomposition du système de décision, afin de produire l'information nécessaire et suffisante à une prise de décision adéquate. Cette hiérarchisation concerne tant les informations endogènes (fournies par le système de production), que les informations exogènes (relatives à l'environnement de production). Ces informations devront subir des agrégations et filtrages successifs qui les mettront en adéquation avec les besoins du niveau décisionnel destinataire.

## 2.2 Le centre de Conduite

La prise de décision pour la gestion ou conduite d'un système de production est effectuée par un *centre de conduite (CC)*. Un centre de conduite est une entité décisionnelle qui pilote une ressource opératoire (partie opérative) plus ou moins agrégée. En effet, quel que soit son niveau hiérarchique, un centre de conduite a en charge la décomposition des tâches qui lui sont affectées en sous-tâches à allouer aux ressources internes (ressources propres) et/ou externes (mises à disposition par d'autres centres). Pour ce faire, chaque centre dispose d'un cadre de décision spécifique (attributs de la décision), utilise des données (données de la décision) et un modèle pour la résolution du problème posé (modèle de décision).

*Remarque :*

*Les différents niveaux de conduite offrent des vues plus ou moins agrégées des tâches et ressources, du niveau des micro opérations et ressources détaillées jusqu'au niveau des macro opérations (processus complexes de transformations) et macro ressources telles qu'unités de production autonomes.*

### 2.2.1 Les attributs du centre de conduite

Le cadre de décision consiste en un jeu d'objectifs, contraintes, variables de décision, critères et informations d'état sur le système piloté. Par ailleurs, des informations endogènes (auto-formulées par le centre) ou exogènes (fournies par les centres de niveau supérieur et/ou extérieurs à la hiérarchie) sont nécessaires (Figure 3.3).

#### Les objectifs

Les objectifs déterminent les résultats attendus de l'action, quel qu'en soit la réalisation (contrairement aux critères qui permettent de trancher entre des décisions concurrentes). Il peut s'agir d'objectifs implicites, ou explicites. Outre des objectifs externes reçus du niveau supérieur dans un lien hiérarchique (par exemple : réaliser le plan d'activité), tout centre de conduite peut intégrer des objectifs internes représentatifs d'intérêts propres (par exemple : optimiser économiquement l'utilisation d'une ressource).

#### Les contraintes

Les contraintes limitent l'espace dans lequel les variables de décision prennent leurs valeurs. Plusieurs classifications de contraintes ont été proposées dans la littérature [Roy, 1970], [Erschler,76], [Fox,87], [Le Pape,89]. Pour les besoins de notre travail, nous considérerons les contraintes suivantes :

- Les **contraintes temporelles** définies par les dates de début au plus tôt et de fin au plus tard d'exécution d'un plan. Souvent, la date de début au plus tôt est liée aux délais d'approvisionnement des matières premières (ou des produits semi-finis) ou, dans le cas de procédés biologiques ou chimiques, à des temps de traitements spécifiques (thermoformage, stérilisation,...). Les dates de fin au plus tard sont pour leur part liées à l'échéancier établi dans le but de respecter la date de livraison des produits finis.

- Les **contraintes de précedence** expriment les relations d'antériorité et/ou de synchronisation entre les tâches d'un processus de transformation.
- Les **contraintes de capacité** des ressources, limitées dans leur polyvalence et leur débit de travail.
- Les **contraintes de disponibilité** des ressources selon qu'elles soient actives, au repos, ou hors service.

D'une manière générale, les contraintes peuvent être d'origine externe (imposées par des centres environnants) ou internes (propres à chaque centre ou auto-formulées : contraintes de productivité des modes opératoires par exemple). Elles peuvent être molles (contraintes renégociables) ou dures (lois immuables).

### Les variables de décision

Les variables de décision représentent les moyens d'actions d'un centre de décision sur le système piloté. Dans le cas de la conduite de ressources de production, ces variables peuvent concerner l'affectation de la main d'œuvre, le recours aux heures supplémentaires, la priorité des OF, etc...

### Les critères

Dans l'espace des variables de décision limité par les contraintes, le choix d'une solution de conduite parmi l'ensemble des possibilités répond à un, voire plusieurs critères. Ceux-ci portent le plus couramment sur le coût, la qualité, le délai, l'utilisation des ressources, etc. Boucon propose une classification des différents critères et indices de performance dans le contexte de l'ordonnancement de la production [Boucon, 1991]. Dans la plupart des cas, ces fonctions de coût sont multicritères ; il s'agit alors de trouver le meilleur compromis entre des critères souvent antagonistes.

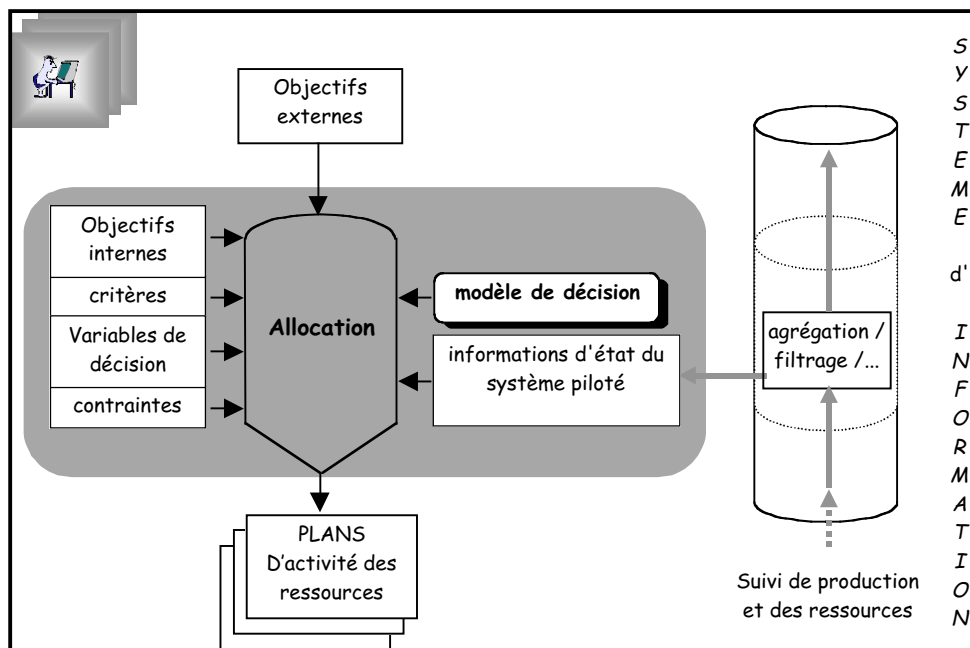


Figure 3.3 - Modèle d'un centre de conduite

#### 2.2.2 Les paramètres et variables du centre de conduite

##### Le modèle de décision

Le modèle de décision détermine la méthode de résolution formelle ou empirique proprement dite du problème de conduite posé. Notre travail s'inscrit dans un objectif d'aide à la décision, sans prendre parti sur le choix de la solution d'allocation qui revient à un décideur humain ou, le cas échéant, à un algorithme. Le modèle de décision reste donc en dehors du champ de notre étude.

### Les informations et données de la décision

Les décisions de conduite mentionnées au paragraphe précédent s'appuient sur des informations concernant l'état de l'activité des ressources. Ces informations concernent d'une part, la trace du système piloté : *informations passé-présent* (état d'avancement des OF par exemple) et d'autre part, le comportement prévisionnel du système : *informations présent-futur* (description du comportement attendu du système jusqu'à la fin de la période de prise de décision considérée par exemple).

En outre, ces mêmes décisions sont basées sur un ensemble de données réparties en deux catégories :

- les *données statiques* (paramètres) : les gammes, les nomenclatures, les horizons et périodes décisionnels et les ressources internes et/ou externes accessibles,
- les *données dynamiques* (variables) : les niveaux de stock, les carnets de commandes, la disponibilité et la charge des ressources de transformation et de transport.

L'ensemble de ces informations et données relatives aux produits, aux ressources et au temps sont plus ou moins agrégées et de degré de détail nécessaire et suffisant pour le niveau décisionnel considéré.

### Agrégation des données et prise de décision

Dans le cadre d'une structure décisionnelle multi-niveau, il est important de noter le rôle de l'agrégation sur la prise de décision. En effet, considérons deux niveaux de décision consécutifs  $v$  et  $v-1$ . La conduite du système au niveau  $v$  n'est possible qu'en utilisant conjointement les informations passé-présent et présent-futur mentionnées ci-dessus.

- les *informations agrégées d'état passé-présent* concernent le suivi de production ; elle sont fournies par le niveau inférieur  $v-1$ ,
- les *informations d'état présent-futur*, construites par extrapolation des informations d'état passé-présent (exercice passé du système).

Ainsi la qualité et la pertinence des décisions prises sont tributaires :

- du processus d'extrapolation des données lui-même,
- de la fiabilité des informations agrégées,
- des opérateurs d'agrégation/désagrégation des données pour le passage d'un niveau à un autre.

Dans le cadre de la conduite, l'agrégation doit simultanément porter sur les matières, les moyens de production, le travail et le temps. En combinant les différents types d'agrégation, il est possible d'obtenir une modélisation plus ou moins fine de la réalité [Fontan, 1997]. Zolghadri, [Zolghadri, 1998] résume par la Figure 3.4 sa perception de la problématique de l'agrégation de l'information et de la désagrégation des décisions dans une structure multi-niveau, au regard de la compatibilité et de l'amélioration permanente du modèle de décision (Figure 3.4).

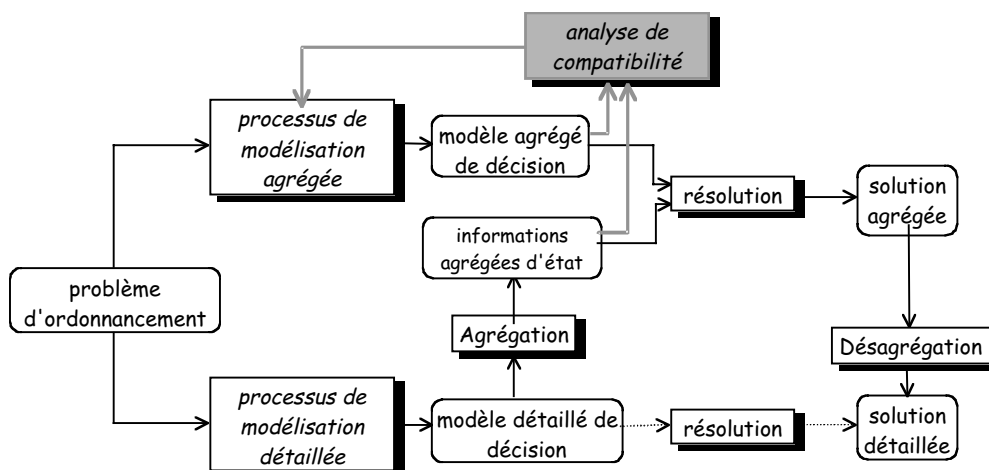


Figure 3.4 - Processus de résolution du problème d'ordonnement (Zolghadri)

## 2.3 Les interrelations entre centres de conduite

Dans un système distribué de conduite, chaque centre interagit avec d'autres. Il en résulte que les décisions prises par un centre amont constituent des contraintes pour les centres situés en aval, le degré d'assujettissement d'un centre à l'autre dépendant du niveau décisionnel auquel chacun appartient. Nous distinguons à ce sujet les relations *hiérarchiques* des relations de *coopération*. Les liens hiérarchiques sont structurels et durables tandis que les liens coopératifs sont négociés et souvent éphémères.

### 2.3.1 Les relations hiérarchiques

Les relations hiérarchiques impliquent des centres de conduite relevant de niveaux décisionnels adjacents. Au niveau supérieur, une décision est élaborée sur l'horizon de décision agrégé, à partir des données appropriées et de l'état agrégé des ressources. Cette décision est transmise au niveau inférieur, où se construit la décision détaillée à partir des données détaillées, de l'état détaillé des ressources et de la désagrégation de la décision agrégée.

Afin de garantir le bon fonctionnement d'une structure décisionnelle multi-niveau, il convient de proposer à chaque niveau de la structure des modèles de données adéquats (nécessaires et suffisants) permettant de gérer les interactions entre niveaux, ainsi que des règles de vérification de la cohérence entre ces modèles de données de niveaux de conduite adjacents.

### 2.3.2 Les relations de coopération

Les relations de coopération impliquent des centres de conduite de même niveau. De façon générale, la coopération est entendue comme une action collective permettant de satisfaire l'intérêt de chaque partenaire. Différentes typologies de la coopération sont proposées dans la littérature, selon :

- la nature du système considéré eu égard aux ressources, objectifs et compétences des acteurs participant à cette action collective [Ferber, 1995], [Soubie, 1994],
- la nature de l'action effectuée [Camalot, 2000],
- la distance entre les coopérants, [Bérard, 2000],

Ferber identifie trois types de coopération :

- la **collaboration simple** qui consiste à grouper des compétences sans chercher à coordonner les actions,
- la **collaboration par surcharge** durant laquelle des acteurs partagent des ressources communes de façon autonome,
- la **collaboration coordonnée** par laquelle des acteurs partagent des compétences et des ressources et doivent coordonner leurs activités.

Pour Soubie, le type de coopération diffère selon que les collaborateurs ont un objectif commun, partagent des informations, disposent d'un outil de communication commun ou doivent ajuster leurs actions en fonction du comportement de leurs homologues.

Camalot distingue trois aspects de coopération, à savoir : la coordination, la collaboration et la codécision.

- La **coordination** assure la synchronisation des actions individuelles et la cohérence de ces actions par rapport à l'ensemble du processus, dans le temps,
- La **collaboration** permet à différents opérateurs de travailler ensemble à l'exécution d'une action donnée dans le but d'atteindre un résultat final,
- La **codécision** est le cas particulier de la collaboration lorsque l'action consiste en une prise de décision.

Selon Bérard, les interactions entre deux systèmes autonomes coopératifs peuvent être caractérisées dans un référentiel à trois dimensions : la fonction, le système opérant, la transaction. Une distance est définie mesurant l'éloignement fonctionnel, opérationnel ou transactionnel des systèmes coopérants. L'analyse des valeurs possibles de chaque critère permet d'identifier des cas types de coopération.

Dans le cadre de nos travaux, nous ne retenons que deux types de relations entre centres de conduite : les relations client/fournisseur et les relations donneurs d'ordres/sous-traitant. Ce faisant, nous nous rapprochons de la typologie de coopération proposée par Camalot.

*Remarque : nous nous plaçons du strict point de vue de l'exploitation d'un réseau de production, et ne*

*considérons pas les phases préalables d'établissement de ce réseau (négociation, protocoles de communication, etc.)*

## 2.4 Les interfaces des centres de conduite

### 2.4.1 La distinction Produits / Transformations

Dans le cadre de cette thèse, une distinction est systématiquement faite entre *produits* et *transformations*. Ceci nous a semblé fondamental à plusieurs titres :

- l'origine et la nature des commandes entre les acteurs du réseau industriel. Nous distinguerons les commandes libellées en quantités de produits et les commandes libellées en travaux de transformations, ce distinguo justifiant d'ailleurs la terminologie industrielle de *fournisseurs* (de produits) ou de sous-traitants (de travaux),
- les différents modes de gestion (tiré par la commande de produits, poussé par l'allocation de travaux) du flux physique cohabitent de facto dans les organisations industrielles, parfois au sein d'une même entreprise (MRP/Kanban) et a fortiori au sein d'un réseau d'entreprises, rendant nécessaire un modèle générique instanciable aux diverses situations,
- les rapports entre gestion des stocks et gestion des ressources doivent demeurer explicites, condition sine qua non d'une gestion globale cohérente. En effet, l'état des stocks est caractérisé par les produits qui s'y trouvent, l'activité des ressources est caractérisée par les travaux de transformation alloués à ces ressources.

#### Nature des relations entre acteurs

Quel que soit le niveau décisionnel considéré, les prestataires des centres de conduite sont d'autres centres de conduite, soit de même niveau (client, fournisseur, donneur d'ordres, sous-traitant), soit de niveau différent (donneurs ou preneurs d'ordres hiérarchiques). Selon les liens structurels ou conjoncturels entre les différents acteurs du système de production, les commandes qui transitent entre ces acteurs sont, comme nous l'avons vu précédemment :

- soit de type produit : lien client/fournisseur
- soit de type transformation : lien donneur d'ordres/sous-traitant

*Remarque : le cas particulier de centres de conduite chargés de l'exploitation de ressources propriétaires (lien de gestion, typique des organisations verticales et traditionnellement rencontrées dans une même entreprise) diffère peu du lien de sous-traitance. Dans les deux cas en effet, le centre gestionnaire commande des travaux de transformation aux ressources qui lui sont dévolues, et se préoccupe conjointement de leur approvisionnement en produits.*

En définitive, nous nous attacherons à formaliser, quels que soient les liens entre acteurs industriels, deux types de commande : produits et travaux (de transformation des produits).

- les produits spécifient des objets caractérisant des états déterminés de la matière, auxquels correspondent des niveaux de fonctionnalité. Les produits se transportent et se stockent, dans l'état, moyennant des ressources ad hoc,
- les travaux spécifient des transformations de produits entrants en produits sortants à plus forte valeur ajoutée. Les travaux requièrent des ressources de transformations.

Comme on le voit, le fait d'étendre la problématique de gestion de production aux réseaux d'entreprises ne modifie guère les fonctions à assurer : il s'agit en effet de coordonner, certes à plus large échelle, les flux d'approvisionnement des produits avec la dynamique des transformations, et ce à l'aide des trois types génériques de ressources que sont les stocks, les ressources de transport et les ressources de transformation.

#### Flux poussés, flux tirés

La mise en réseau a posteriori d'entreprises possédant leurs propres modalités de gestion conduit à des organisations hétérogènes, dans lesquelles les approches pro-actives (flux poussé) cohabitent avec les approches réactives (flux tiré). Notons que le flux tiré est le propre d'une relation client-fournisseur (appel

du client, réponse du fournisseur) et s'exprime par des commandes de produits. A contrario, le flux poussé traduit un lien de gestion hiérarchique interne (allocation de travaux) ou externe (sous-traitance de travaux) s'exprimant au travers de commandes de transformations.

La mise en évidence des deux types de données (produits et transformations) dans le modèle que nous avons développé vise donc également à représenter les structures de gestion dans le réseau de ressources.

### La relation produit/travail/processus

Une attention particulière est portée sur la formalisation des transformations qu'un centre de conduite (CC) doit réaliser. Premièrement, la qualification et quantification des travaux conduit à une meilleure compréhension des invariants de production. En particulier, les travaux à réaliser peuvent être déterminés directement à partir des carnets de commandes sans préjuger des ressources à mobiliser. Deuxièmement, les exigences en termes de travaux issus des carnets de commandes et les potentiels de travail offerts par les ressources doivent être évalués simultanément, et requièrent de ce fait la même formalisation.

Dans le même temps, la spécification du carnet de commande en flux de produits à réaliser permet de confronter la demande externe à l'état des stocks physiques du décideur et d'identifier ses besoins nets.

#### 2.4.2 Les interfaces génériques d'un centre de décision

De manière à couvrir une large classe de situations, nous considérons que chaque CC peut simultanément se trouver dans des relations de type donneur d'ordres/sous-traitant et de type client/fournisseur, auxquelles correspondent des commandes libellées en transformations, respectivement en produits.

Compte tenu des liens hiérarchiques et de partenariats impliquant le CC, celui-ci est potentiellement impliqué dans les relations génériques suivantes (Figure 3.5) :

- relation donneur d'ordres hiérarchique /sous-traitant hiérarchique par laquelle le CC reçoit ou émet une commande de transformations,
- relation coopérative donneur d'ordres/sous-traitant par laquelle le CC reçoit ou émet une commande de transformations,
- relation client hiérarchique /fournisseur hiérarchique par laquelle le CC reçoit ou émet une commande de produits,
- relation coopérative client/fournisseur par laquelle le CC reçoit ou émet une commande de produits.

Nous représentons les interfaces génériques d'un centre de conduite de la façon suivante :

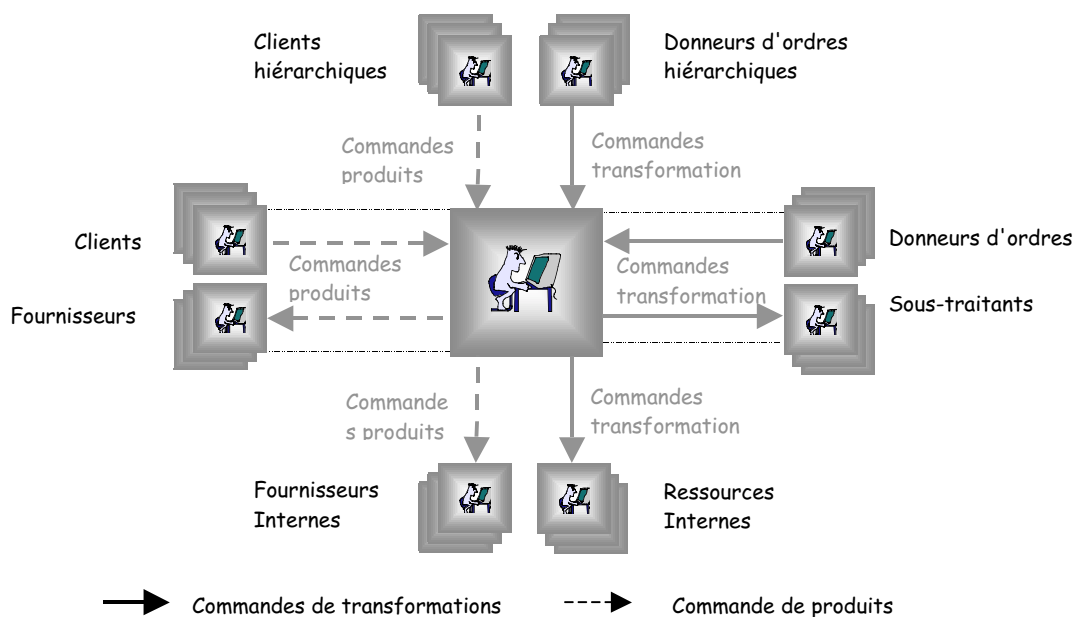


Figure 3.5 - Interfaces génériques d'un centre de conduite

En pratique, cet environnement générique sera le plus souvent simplifié. A titre d'exemple, la figure suivante présente le cas d'une entreprise sous-traitante impliquée dans un réseau non supervisé (Figure 3.6). L'entreprise possède ses propres donneurs d'ordres. Les commandes de transformations sont issues de donneurs d'ordres de même niveau. Afin de réaliser ces commandes, l'entreprise pourra sous-traiter une partie des activités qui lui ont été confiées, et/ou réaliser ces activités en interne sur ses propres ressources.

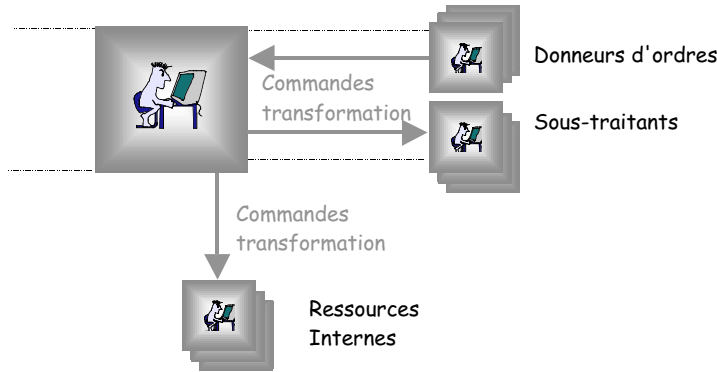


Figure 3.6 : Exemple d'instanciation d'un centre de conduite

Sur la base de cette caractérisation, nous allons, dans un premier temps, définir l'architecture de conduite sur laquelle est basée notre proposition puis, dans un second temps, présenter un processus décisionnel générique instanciable à tout centre de conduite.

### 3 CONCEPT DE CONDUITE HIERARCHISEE

#### 3.1 Architecture de conduite hiérarchisée

L'architecture de conduite proposée par Zolghadri [Zolghadri, 1998] repose sur une décomposition de la structure décisionnelle "isomorphe" à l'arborescence de décomposition des transformations et des ressources. Chaque centre de conduite, quel qu'en soit le niveau hiérarchique, a pour rôle de conduire une unité de production, peu ou prou agrégée, dans l'exécution de transformations de niveau d'agrégation correspondant. Le processus décisionnel vertical mis en exergue dans la grille GRAI peut alors se décliner comme une désagrégation récursive de plans de production et une allocation itérative des transformations aux ressources (Figure 3.7).

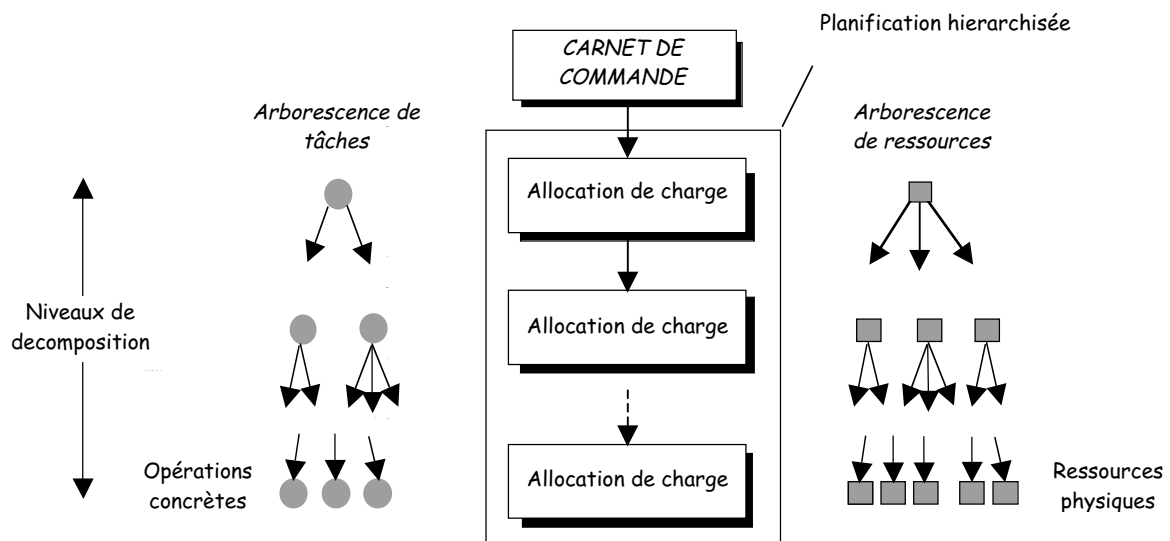


Figure 3.7 - Principes de base de l'architecture de conduite hiérarchisée

### 3.2 Architecture de conduite généralisée

Dans le cadre de nos travaux, nous étendons cette architecture de conduite aux systèmes de production réticulaires. L'aspect distribué de la production est ici pris en compte par l'allocation itérative des transformations non plus seulement aux ressources internes (de niveau inférieur) mais également aux ressources externes accessibles par coopération.

Considérons en effet (Figure 3.8) une ressource  $r$  de niveau  $v$ , notée  $(r,v)$  composée d'un ensemble de ressources internes  $\{(r',v-1)\}$  et pouvant coopérer avec un ensemble de ressources externes  $\{(r',v)\}$  de même niveau. Les travaux attendus de la ressource  $(r,v)$  sont définis par un plan d'activités. Une fois ce plan déterminé, il s'agit de distribuer la charge totale de cette ressource au sein d'un ensemble de ressources accessibles  $\{(r',v-1)\} \cup \{(r',v)\}$ , ce qui relève d'une allocation.

Les ressources internes  $\{(r',v-1)\}$  sont, lors de cette affectation, considérées comme des ressources agrégées dont le plan d'activités résulte de l'allocation citée. Les plans de ces ressources  $\{(r',v-1)\}$  devront à leur tour être détaillés par les centres gestionnaires qui procéderont à une allocation interne et/ou externe de travaux plus précis. On engendre ainsi une cascade d'allocations, réitérée jusqu'à définir les plans d'activités des ressources ultimes, feuilles de l'arborescence de décomposition du système physique. Les ressources externes  $\{(r',v)\}$  sont les ressources sous-traitantes. Le plan d'activité reçu par chacune d'elles pourra à son tour être ré-alloué au sein de nouvelles ressources internes et/ou externes.

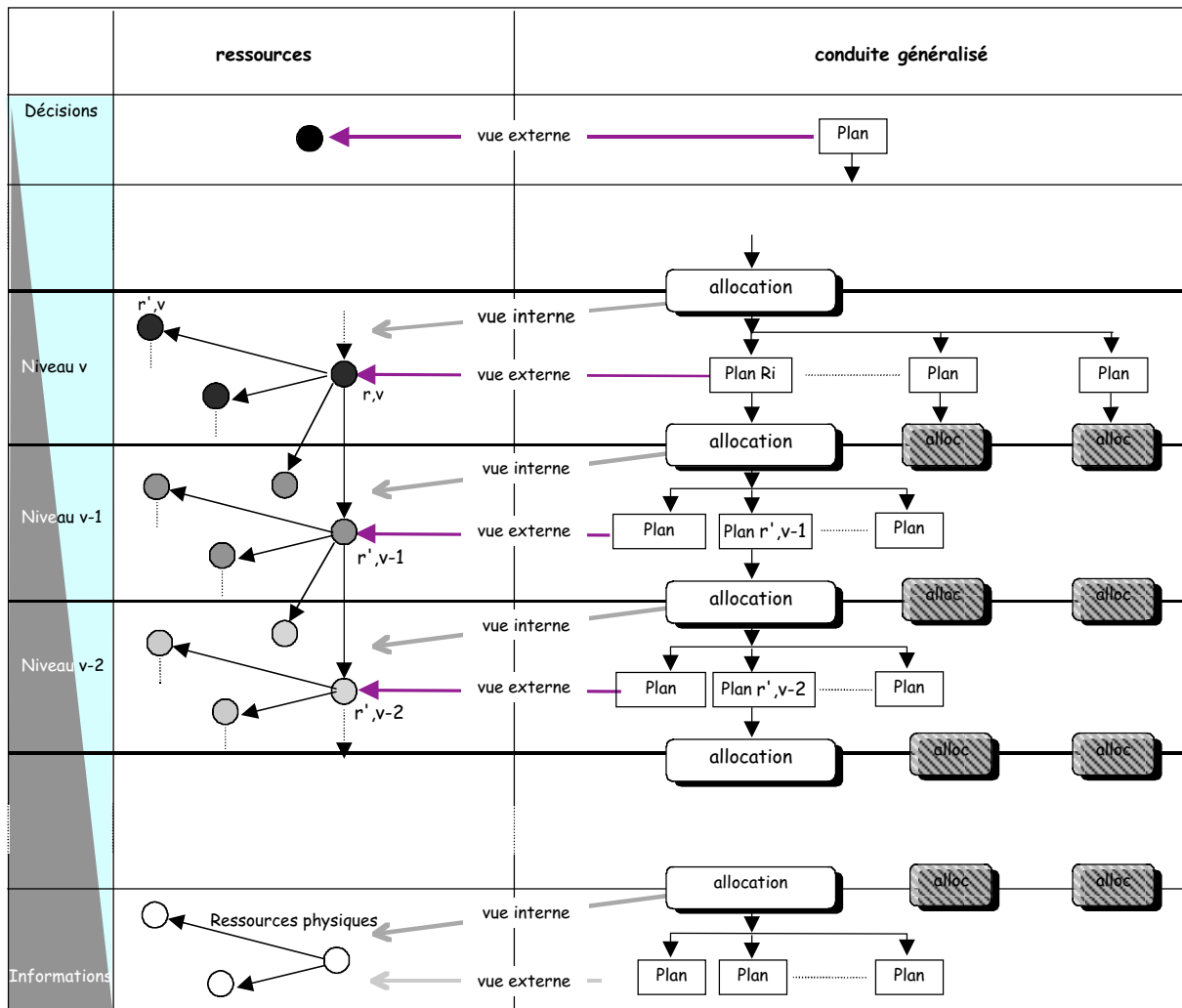


Figure 3.8 - Conduite généralisée (dérivée de [Zolghadri, 1998])



Dans cette approche de "conduite généralisée", la seule activité décisionnelle est l'**allocation**<sup>32</sup> qui transforme les consignes d'une ressource agrégée en consignes réparties sur des ressources de même niveau, et/ou sur des ressources du niveau inférieur. En d'autres termes, l'allocation est une primitive de décomposition et de distribution interne et/ou externe de plans d'activité.

En définitive, le flux de décisions multi-niveau commence par un plan d'activité (pour la ressource la plus agrégée) et se termine par une série de plans d'activités (pour les ressources les plus détaillées), étant entendu que les limites supérieures et inférieures de la décomposition sont fixées par les frontières du système considéré. Pour une unité de production de l'importance d'une entreprise multi-site, le Plan Directeur de Production est la donnée la plus agrégée, les programmes machines et les tâches manuelles constituant les plans les plus détaillés.

### 3.3 Fonctionnement de l'architecture de conduite généralisée

#### 3.3.1 Processus de conduite généralisé

Compte tenu de son environnement, chaque centre de conduite peut recevoir de ses semblables un plan d'activité à réaliser, et/ou des commandes d'objets échéancées, et ce par des liens coopératifs et/ou hiérarchiques. L'objectif est alors d'allouer les travaux requis par les différents carnets de commandes (produits et/ou transformations) aux ressources de transformation accessibles et, conjointement, d'assurer les approvisionnements nécessaires à ces travaux.

Une première décision consiste alors à déterminer les produits (matières premières, sous-ensembles, produits semis finis) qui seront achetés, prélevés dans les stocks ou réalisés en interne. A l'issue de ce premier choix, une deuxième décision consiste à évaluer, pour les produits à réaliser, les travaux requis, eu égard aux processus de transformation à mettre en œuvre. Ces travaux, cumulés aux travaux commandés au travers d'un lien de sous-traitance, seront alloués aux ressources internes et/ou externes accessibles par le centre de décision et dont la disponibilité est ici supposée fournie par un tableau de bord, et ce à chacun des niveaux de la structure décisionnelle.

Le scénario d'allocation obtenu engendre un plan de production pour chaque centre de conduite de niveau inférieur. Ces centres de conduite ayant en charge des ressources de moindre échelle devront à leur tour mettre en œuvre un processus décisionnel analogue au précédent. Selon ce principe, un flux de décisions descend d'un centre à un autre au travers d'un lien de coordination ou coopération, tandis qu'un flux d'information monte d'un tableau de bord à un autre.

*Remarque : dans le cadre de nos travaux, nous généralisons la notion de carnet de commandes à l'ensemble des commandes qu'un centre de décision reçoit, qualifiées et quantifiées en termes de produits et/ou transformations à effectuer, ceci à n'importe quel niveau de conduite.*

Dès lors, deux sous-activités décisionnelles indissociables émergent du processus de conduite présenté ci-dessus. Le premier consiste en un calcul besoin/charge, le second, en une allocation de charge (Figure 3.9) [Lecompte 2000].

#### 3.3.2 Activités décisionnelles d'un centre de conduite

##### Le calcul besoin/charge

Ce calcul permet de déterminer le nombre de produits à fabriquer, à prélever dans les stocks et/ou à acheter afin de répondre au carnet de commande sur l'horizon de planification. Une telle décision doit tenir compte des niveaux courants de stock d'objets et intègre des règles de gestion des stocks : politique de régulation des stocks, niveau de stock de sécurité, etc., ce qui fera l'objet du chapitre 4. Le résultat de cette décision est la spécification de la quantité de transformations (travaux) que le centre de décision doit réaliser afin de respecter son carnet de commandes. Des règles de cohérence permettant de garantir la faisabilité des décisions prises seront proposées dans ce même chapitre.

---

<sup>32</sup> Nous distinguons l'allocation de la planification et de l'ordonnancement (voir chapitre 2 § 1.2) et lui associons la définition suivante : l'allocation consiste à programmer l'exécution de tâches sur des ressources dans un intervalle de temps donné (horizon de planification)

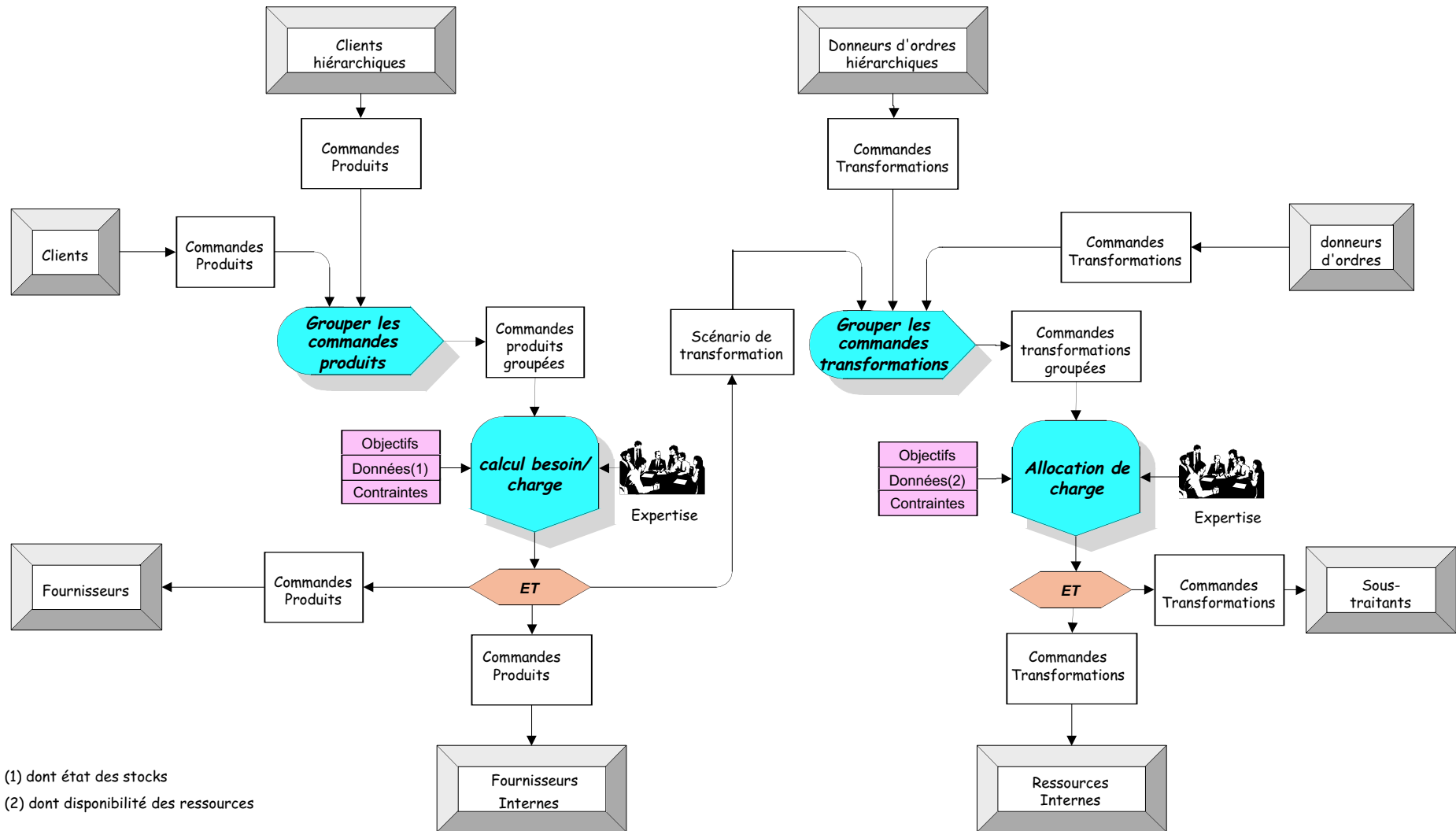


Figure 3.9 - Processus décisionnel d'un centre de conduite

### L'allocation de charges

L'allocation des charges fera l'objet du chapitre 5. Il s'agit de partitionner les travaux (issus du calcul précédent et/ou commandés par des donneurs d'ordres externes) en charges plus petites qui seront ensuite allouées dans le temps et dans l'espace à des ressources de production dont on suppose la disponibilité fournie par un tableau de bord. Les contraintes liées aux transports entre les ressources de production sont prises en compte dans un second temps.

Ici encore, des règles de cohérence permettant de garantir la faisabilité des décisions prises seront proposées à la fin du chapitre.

#### 3.3.3 Objectifs de modélisation

Les objectifs de modélisation sont de délimiter le cadre de décision à l'usage du décideur. Il ne s'agira pas d'automatiser la décision, mais de proposer au décideur, via un outil interactif d'aide à la décision, l'ensemble des alternatives possibles (Figure 3.10)

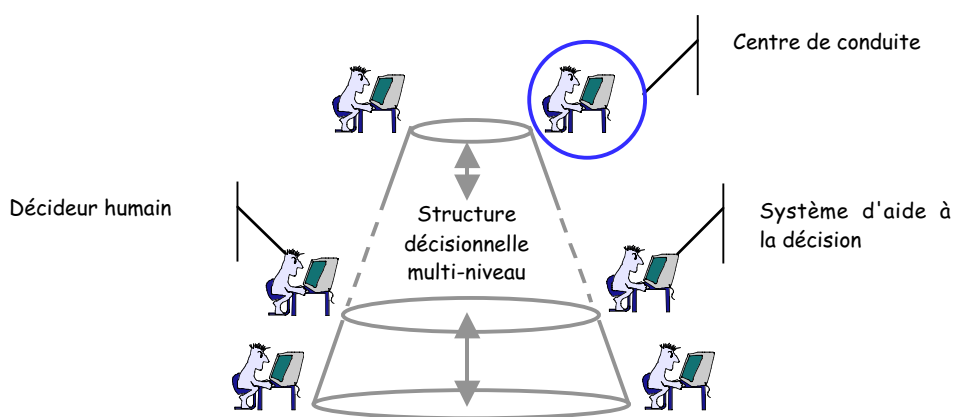


Figure 3.10 - Système interactif d'aide à la décision

#### 3.3.4 Données et contraintes du processus de conduite

Les décisions mentionnées au paragraphe précédent sont basées sur les données suivantes :

- les données statiques : les gammes, les nomenclatures, les horizons et périodes, les ressources de transformation et de transport internes et/ou externes disponibles, ...
- les données dynamiques : les niveaux de stock, les quantités de transformations et de produits, la charge et la disponibilité des ressources de transformation et de transport, la taille des lots de transformation et de transport, les délais opératoires etc...

Ces informations sont, par hypothèse, fournies par un tableau de bord et remises à jour en rapport avec la dynamique de la prise de décision du centre considéré.

De plus, chaque scénario d'allocation doit satisfaire un ensemble de contraintes :

- contraintes de couverture des travaux,
- contraintes de capacité des ressources de transformation pour chaque période de temps,
- contraintes de précedence des opérations pour chaque produit,
- contraintes de capacité des ressources de transport pour chaque période de temps,
- contraintes d'approvisionnement.

Nous venons de lister les principales variables du modèle de données développé dans les chapitres 4 à 6.

## 4 CONCLUSION

L'architecture de conduite généralisée exposée dans ce chapitre constitue la toile de fond des développements des chapitres suivants. C'est une structure alternant planification et allocation de la production aux divers niveaux de décision. Il s'agit d'une décomposition structurelle du système décisionnel de conduite isomorphe à la décomposition des ressources et des activités de production. Pour chaque

ressource, un plan d'activités est défini. La désagrégation de ce plan en plans détaillés est consécutive à une décision d'allocation. Ces derniers constituent à leur tour des plans d'activité pour les ressources internes et externes mises à contribution.

Chaque ressource est gérée par un centre de conduite soumis à un ensemble de contraintes (cadre décisionnel) délimitant l'espace des décisions admissibles. Les décisions émanant des divers centres influent inévitablement les unes sur les autres, et c'est l'un des objectifs de notre travail que de formaliser ces interactions.

Le processus de décision qui permet à un centre de dégager les scénarios d'allocation (internes et externes) des travaux appelle deux types de décision : d'une part le calcul conjoint des besoins et des travaux, d'autre part l'allocation des travaux aux ressources accessibles. C'est l'objet des chapitres 4 et 5 que de modéliser les données et les résultats de ces décisions, et de proposer un jeu de règles permettant d'en garantir la cohérence.

## Chapitre 4

# Un modèle généralisé pour le calcul besoin/charge

Ce chapitre s'attache à une description formelle de la problématique de planification/ ordonnancement telle qu'elle se présente à un centre de conduite quel qu'il soit dans la structure décisionnelle présentée au chapitre 3. Comme indiqué au chapitre précédent, le centre de conduite est destinataire de commandes (libellées en produits ou en travaux) émanant d'autres centres de conduite agissant pour le compte de clients et/ou de donneurs d'ordre. En fonction de ces demandes échéancées, un carnet de commande est élaboré, défini sur un horizon déterminé que nous laisserons, dans ce chapitre, implicite de manière à alléger les notations. Il s'agit dès lors de planifier la production tout en prenant en compte les contraintes des fournisseurs, des sous-traitants et la capacité des ressources accessibles.

Ce faisant, chaque centre doit gérer son système de production en tenant compte des aléas, et parfois de décisions concernant les réapprovisionnements de matières premières et la livraison des produits finis.

Le modèle présenté ici permet de raisonner analytiquement sur les rapports existant entre une production donnée et les travaux nécessaires à son obtention, compte tenu d'une part des processus de fabrication et d'autre part des exigences de gestion de stock. Tout d'abord, nous représentons par un réseau de Petri l'ensemble des processus de production connus du centre de conduite, c'est-à-dire potentiellement réalisables par les ressources internes et / ou externes accessibles à ce centre de conduite. Les propriétés d'analyse de ces réseaux nous permettent ensuite d'évaluer analytiquement les exigences conjointes en matière et en travaux afin de répondre au carnet de commande produits. La gestion des stocks ne pouvant être séparée de la production pour des raisons techniques évidentes de disponibilité des composants, mais également pour des raisons stratégiques et économiques, des politiques de régulation des stocks de tout type (produits finis, semi-finis et composants) peuvent être intégrées.

Dans ce qui suit, le calcul de besoin se réfère aux fournitures nécessaires à la production envisagée, tandis que le calcul de charge détermine les travaux de transformation nécessaires à ladite production.

Ce faisant, nous raisonnons sur les *invariants* de production indépendants des ressources impliquées.

Le raisonnement comporte trois phases qui, chacune, fait appel à un arbitrage du centre de conduite (Figure 4.1).

- phase 1 : sur la base du carnet de commande libellé en produits, un premier calcul est effectué afin de déterminer les besoins nets initiaux en approvisionnements. Ce calcul intègre les niveaux courants de stocks sur la période de fabrication considérée, des politiques de régulation de stocks permettant de garder les niveaux de stocks à l'intérieur d'une épure (présence de stocks de sécurité, stocks plancher, stocks plafond, capacité de stockage, ...) ainsi que des données statiques telles les gammes et les nomenclatures. Il importe de noter que le calcul des besoins n'est pas déterministe car il suppose l'expression d'une stratégie de gestion des stocks.
- phase 2 : les volumes à produire réellement étant déterminés, il faut évaluer la quantité de travail (charge) correspondante, et choisir parmi les solutions possibles celle qui satisfait les critères locaux de performance. Nous mettrons en évidence l'incidence des cibles de production et des structures logiques des processus (gammes), sur la dimension de l'espace des solutions admissibles.
- phase 3 : suite au choix d'un scénario de charge, un calcul des besoins nets définitifs est effectué. Celui-ci conduit, d'une part, au choix des prestataires d'approvisionnement (fournisseurs externes et/ou internes) et, d'autre part, à la définition d'un plan de production.

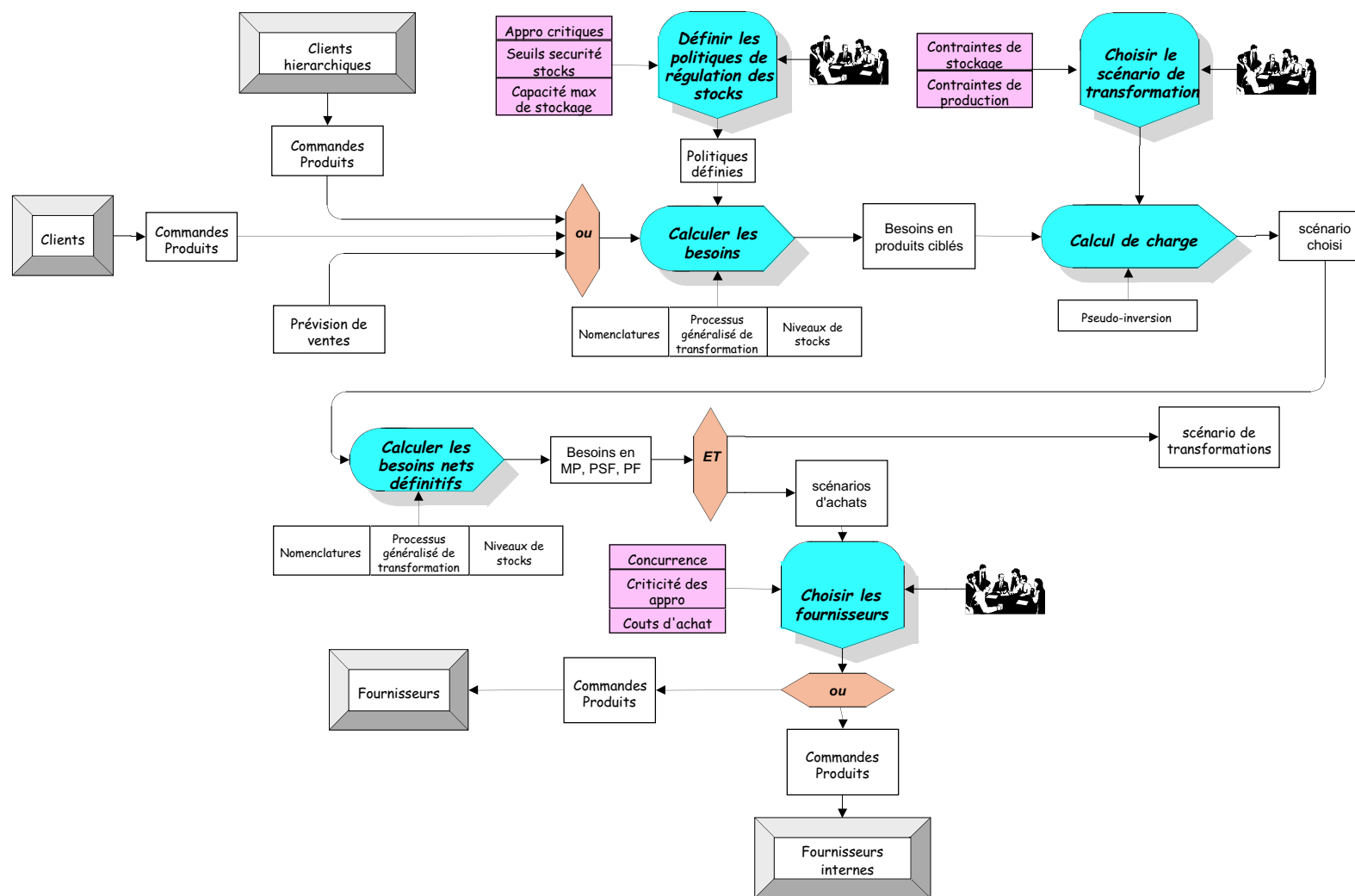


Figure 4.1 - Activités du Calcul besoin/charge

## 1 CALCUL DE BESOIN / CALCUL DE CHARGE

### 1.1 Les besoins nets : phase 1

Nous nous intéresserons au cas général des produits manufacturés. Les demandes en produits finis, semi-finis et composants nécessaires à la réalisation d'un carnet de commande ne sont pas indépendantes. En effet, par des liens de nomenclature, une demande en produits finis induit une demande en composants du niveau inférieur de la nomenclature.

Les méthodes classiques de calcul de besoins par rechargement des stocks (système à point de commande, système à rechargement périodique, etc.) sont mal adaptées à la gestion des systèmes de production actuels. Les raisons principales en sont les suivantes :

- le calcul des besoins par rechargement fonctionne sur des modèles de prévisions statistiques. De tels modèles ne sont pas utiles lorsqu'il s'agit de composants ou de sous-ensembles car la demande les concernant découle du programme de production des produits parents. Cette dépendance est exprimée par la nomenclature,
- ces techniques de gestion de stocks supposent une demande suffisamment régulière pour être statistiquement fiable, ce qui n'est pas le cas dans le contexte de production actuel où la demande est changeante,
- enfin lorsque le nombre de produits à fabriquer croît, on constate que la fiabilité du temps de réponse au carnet de commandes décroît, du fait du cumul des erreurs de prévisions [Doumeingts, 1994].

La technique MRP permet de déterminer les besoins en deux étapes : un calcul des besoins bruts suivi d'un calcul des besoins nets (Figure 4.1bis), pour lesquels des desiderata de gestion des stocks pourront être intégrés. Cette approche systématique est la base de notre travail.

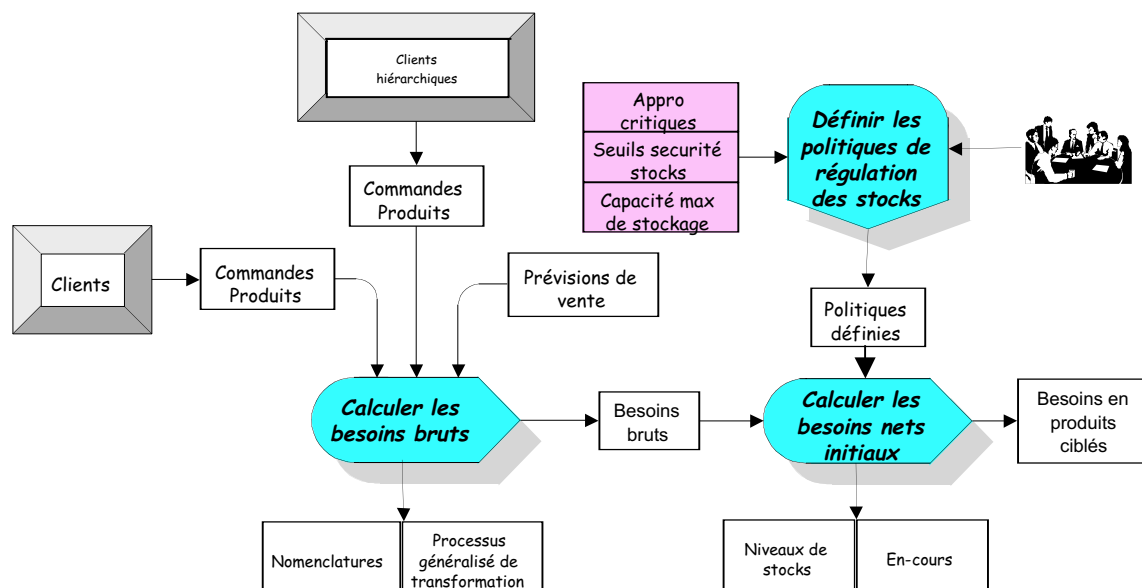


Figure 4.1bis - Calcul des besoins (Méthode MRP)

#### 1.1.1 Le calcul des besoins bruts

Le calcul des besoins bruts permet, à partir des commandes enregistrées et des prévisions de vente, de définir les dates de réalisation des produits finis au plus tard. La nomenclature et la gamme associée permettent de déduire les besoins bruts en sous-ensembles et composants pour réaliser les produits demandés.

#### 1.1.2 La gestion des stocks

Les stocks permettent de lisser le flux physique de production. Par leur pouvoir d'accumulation, ils accordent les flux discrets de matière dans le système (indépendance des fréquences opératoires) ou entre

le système et son environnement (lissage des retards d'approvisionnement, expédition sur stock). Les politiques de gestion des stocks définies par le gestionnaire des stocks (ici le centre de conduite) sont nombreuses et diffèrent d'une entreprise à l'autre. Elles visent à déterminer les quantités immobilisées dans les stocks et permettent ainsi :

- de garder les niveaux de stocks à l'intérieur d'une épure comme nous l'avons déjà dit,
- d'intégrer des contraintes propres de régulation des stocks liées à la volonté de rationaliser les flux de production pour une production donnée sur une période donnée (maintien de stocks d'en-cours, matières premières, et produits finis),
- d'intégrer des contraintes économiques (regroupement des composants en vue de production de quantités économiques),

Pour définir les politiques de régulation des stocks, il est nécessaire d'étudier les conséquences du stockage selon des critères internes et externes aux entreprises, parmi lesquels :

- les coûts de possession, les coûts administratifs de gestion et de stockage, les coûts de rupture de production (critères internes),
- les coûts liés à la perte d'un client ou d'un marché (critères externes).

D'autres techniques sont utilisées afin de permettre d'identifier les approvisionnements critiques, telles la méthode des 80-20 ou encore la classification ABC [Courtois, 1995].

### 1.1.3 Le calcul des besoins nets

A partir des besoins bruts et après intégration des différentes politiques de régulation des stocks, des niveaux de stocks disponibles, le calcul des besoins nets initiaux permet de déterminer la quantité d'articles ciblés nécessaire à la réalisation du carnet de commandes en interne ou approvisionnée. Par articles ciblés, on entend ici les articles dont le centre de conduite tient à contrôler la production ou consommation, étant entendu que les besoins nets réels sont conditionnés par le plan de charge, comme nous le verrons dans ce chapitre.

## 1.2 Le calcul de charge : Phase 2

Le calcul des besoins nets initiaux a permis de définir les besoins en composants ciblés à réaliser. Chaque produit étant obtenu par un processus déterminé de transformation, l'objet du calcul de charge est de déterminer la quantité de travail nécessaire à la réalisation du carnet de commande produit.

Mis à part le cas réducteur de l'usinage ou de tout autre processus "linéaire" (consistant en une simple séquence de transformations), les processus manufacturiers peuvent être complexes, intégrant des opérations de tout autre type : assemblage, découpage, désassemblage, etc.. Dans ce contexte généralisé, il n'est pas rare qu'un produit semi-fini ou fini puisse être obtenu par différents processus de transformation.

Dans le cadre de notre problématique, l'objectif poursuivi est d'offrir à un décideur l'ensemble de tous les scénarios de production possibles lui permettant de répondre au carnet de commande, tout en respectant les objectifs de régulation de stocks. L'intervention d'un décideur est alors nécessaire pour choisir un scénario de charge parmi l'ensemble des scénarios possibles.

Le calcul formel de charge, cœur de nos travaux, est détaillé au paragraphe suivant.

## 1.3 Les approvisionnements : Phase 3

La matérialisation physique d'une transformation induit une modification du niveau des stocks en objets de tout type (matières premières, produits semi-finis, et finis). Il s'agira, à l'issue du choix du scénario de charge, de déterminer les besoins nets définitifs nécessaires à la réalisation du plan de charge. Ces derniers permettront d'une part de déterminer les quantités à approvisionner et d'autre part d'émettre des suggestions validées de plans de fabrication.

Les quantités à approvisionner ainsi que l'origine et les dates de livraisons échéancées de ces approvisionnements définiront les demandes d'achat. Le rôle de la fonction achat consiste à trouver les produits requis au meilleur prix et dans les délais demandés. Deux types de prestataires sont à même de répondre aux ordres d'achat concernant ces produits : les fournisseurs extérieurs et les éventuels fournisseurs internes.



La sélection des prestataires d'approvisionnement est effectuée par le centre de conduite au regard de différents critères, parmi lesquels :

- la qualité des fournitures,
- le coût d'achat des matériaux,
- le respect des délais,
- la capacité technique de production et d'adaptation du fournisseur,
- le service après vente,
- etc.

## 2 MODELE ALGEBRIQUE DE PRODUCTION

La "charge" ou le "travail", dans une terminologie courante désigne un volume d'activité confiée (réellement ou hypothétiquement) à une ressource de transformation.

Pour les besoins de ce travail, nous définirons formellement la notion de travail sur la base suivante :

- aspect sémantique : la nature du travail fait référence à une typologie des transformations,
- aspect quantitatif : le volume de travail est déterminé par une quantité de transformations. Un travail est "homogène", respectivement "hétérogène" selon qu'il spécifie une quantité de transformations d'un même type, respectivement des quantités de transformations de type varié.
- aspect intrinsèque : la spécification d'un travail ne préjuge nullement des ressources susceptibles de le réaliser.

### 2.1 Modélisation des processus de transformation

Soit  $O$  ( $CardO = m$ ) l'ensemble des  $m$  objets (composants, produits finis ou semi-finis) connus du centre de décision considéré.  $O$  définit l'univers des objets ou *nomenclature - produit*, supposé dénombrable.

Soit  $T$  ( $CardT = n$ ) l'ensemble des  $n$  transformations de toute nature (usinage, assemblage, désassemblage, etc.) connus du centre de décision. L'ensemble  $T$  définit l'univers des transformations ou *nomenclature - tâche*, supposé dénombrable et connu du centre de décision.

Nous représentons une transformation par une transition dans un réseau de Petri [David, 1989], [Dubois, 1983], [Kamath, 1986]. Les places d'entrée de la transition représentent les objets requis par la transformation et les places de sortie les objets engendrés par la transformation. Il est possible qu'une transformation consomme/produise plusieurs exemplaires d'objets d'un même type : les poids des arcs reliant la transition à ses places d'entrée et de sortie sont des entiers décrivant le nombre d'objets de même type consommés/générés par la transformation. Nous pouvons ainsi modéliser tout type de transformation (usinage, assemblage, désassemblage, traitements collectifs) (Figure 4.2).

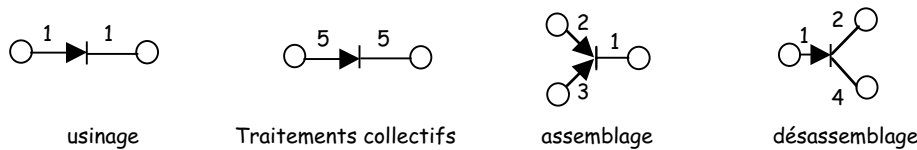


Figure 4.2 - Modélisation des transformations par réseau de Petri

Les relations de précédence entre l'ensemble des transformations et l'ensemble des objets conduisent à établir un réseau de Petri modélisant le *processus de transformation généralisé* [Bourrières, 1998] sous la forme d'un triplet :

$$G = \langle O, T, C \rangle \quad \text{avec } C \text{ matrice d'incidence du graphe } G$$

L'élément  $C_{ij}$ , ( $C_{ij} \in \mathbb{Z}$ ,  $i = 1, \dots, m$  ;  $j = 1, \dots, n$ ) de la matrice  $C$  détermine le nombre d'objets de type  $i$  générés ou consommés par l'exécution d'une transformation de type  $j$ . (Figure 4.3).

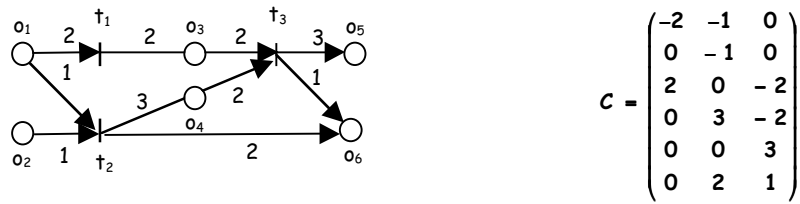


Figure 4.3 - Exemple de processus de transformation généralisé

## 2.2 Equation de production généralisée

Soit  $S_i$  ( $S_i \in \mathbb{N}^*$ ) le niveau de stock courant d'objets de type  $i$ . Le vecteur  $S = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T$  caractérise qualitativement et quantitativement le niveau de **stock généralisé** des objets de la nomenclature  $O$ . Il peut être utile de partitionner l'ensemble  $O$  des objets en trois sous-ensembles :  $O_a$ ,  $O_b$  et  $O_c$  représentant respectivement la nomenclature des matières premières, des produits semi-finis (en-cours de production) et des produits finis. Dans ce cas, nous présenterons le vecteur des stocks généralisés sous la forme:

$$S = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{ll} S_a & \text{vecteur des stocks de composants élémentaires} \\ S_b & \text{vecteur des stocks d'en-cours} \\ S_c & \text{vecteur des stocks de produits finis} \end{array}$$

Soit  $W_j$  ( $W_j \in \mathbb{N}^*$ ) un nombre déterminé de réalisations de la transformation  $t_j$ . Toute production consiste en une quantité de transformations variées à réaliser, défini par le **vecteur travail généralisé**  $W = (W_1 \dots W_j \dots W_n)^T$

La mise en œuvre d'un travail  $W$  engendre une variation du stock généralisé selon la relation linéaire suivante :

$$\Delta S = S' - S = C W \quad C (m \times n) \quad (4.1)$$

où  $S$  représente le niveau initial (i.e. avant le travail  $W$ ) du stock généralisé, et  $S'$  le niveau final du stock généralisé (i.e. après le travail  $W$ ).

L'équation (4.1) est l'équation fondamentale du réseau de Petri  $G$ . Il convient de noter que toute production réalisable par le système considéré vérifie cette équation. Celle-ci constitue un modèle direct de production traduisant les contraintes de processus (gammas). Ce modèle est valable quelles que soient les ressources de production utilisées.

## 3 MODELE ALGEBRIQUE DU CADRE DE DECISION

### 3.1 Problématique d'inversion

Le problème traité est le suivant : soit  $\Delta S$  une cible de production définissant une variation désirée de tout ou partie des composantes du stock généralisé. Cette cible permet non seulement de fixer les quantités désirées de produits finis mais aussi d'émettre des consignes de variation des stocks de toute nature, à des fins de régulation. L'objectif est de déterminer, d'une part, les travaux  $W$  répondant à cette cible et, d'autre part, d'en déduire les variations  $\Delta S$  des stocks non imposées par la cible [Lecompte 1999]. Le modèle (1) peut être affiné comme suit :

$$\Delta S = \begin{pmatrix} \Delta S \\ \Delta S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S' - S \\ S' - S \end{pmatrix} = C W = \begin{pmatrix} C \\ C \end{pmatrix} W \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} C (m \times n) \\ C (m \times n) \\ m + m = m \end{array} \quad (4.2)$$

ou encore :

$$\Delta S = S' - S = C W \quad (4.2bis)$$

$$\Delta S = S' - S = C W \quad (4.2ter)$$

La résolution du système linéaire (4.2) avec  $\Delta \underline{S}$  donné et  $(\mathbf{W}, \bar{\Delta \underline{S}})$  inconnu consiste à identifier l'ensemble des réalisations  $\mathbf{W}$  et l'impact de ces travaux sur la variation de stock laissée libre  $\Delta \underline{S}$ . Les variables de décision du centre de décision lors du calcul besoin/charge sont donc  $\mathbf{W}$  et  $\Delta \underline{S}$ .

### 3.2 Contraintes sur les variables

Les inconnues  $\mathbf{W}$  et  $\Delta \underline{S}$  du modèle (4.2) sont soumises à un certain nombre de contraintes : des contraintes logiques, des contraintes physiques, des contraintes de gestion.

#### 3.2.1 Les contraintes logiques

Les niveaux de stock et la charge de travail sont des entiers naturels :

$$\mathbf{S}, \mathbf{S}' \in \mathbf{N}^m \quad \mathbf{W} \in \mathbf{N}^n \quad (4.3)$$

Par suite, les variations de stock sont des entiers relatifs. Plus précisément, toute variation des composants d'entrée est nécessairement négative ou nulle du fait de la consommation des matières premières, tandis que la variation des produits finis est nécessairement positive ou nulle :

$$\Delta \mathbf{S}_a = \mathbf{S}'_a - \mathbf{S}_a \in \mathbf{Z}^- \quad \Delta \mathbf{S}_b \in \mathbf{Z} \quad \Delta \mathbf{S}_c = \mathbf{S}'_c - \mathbf{S}_c \in \mathbf{Z}^+ \quad (4.4)$$

#### 3.2.2 Les contraintes physiques et de gestion

Les niveaux de stock sont en réalité bornés, soit physiquement (capacité physique de stockage), soit du fait d'une politique de régulation visant à confiner le niveau de stock  $\mathbf{S}_i$  de chaque article à l'intérieur d'une épure :

$$0 \leq \underline{\mathbf{S}}_i \leq \mathbf{S}_i \leq \bar{\mathbf{S}}_i \quad \begin{array}{l} \underline{\mathbf{S}}_i \text{ niveau de stock de sécurité} \\ \bar{\mathbf{S}}_i \text{ niveau de stock maximum} \end{array} \quad (4.5)$$

### 3.3 Modèle inverse de production

Déterminer la charge résultant d'un carnet de commandes spécifié en termes de produits à fabriquer revient :

- soit à inverser le modèle (4.2) en respectant les contraintes (4.3), (4.4), (4.5). Ce modèle est linéaire mais généralement non régulier, ce qui nous ramène à un problème d'inversion linéaire sous-contraintes avec ou sans optimisation.
- soit à résoudre un problème de satisfaction de contraintes de type égalité (modèle (4.2)) auxquelles s'ajoutent les contraintes inégalité précédentes (4.3), (4.4), (4.5).

Nous adoptons la première approche procédant par pseudo-inversion.

#### 3.3.1 Résolution par la méthode de la pseudo-inverse

La méthode de résolution basée sur la pseudo-inverse est applicable à tout système linéaire et fournit une formulation algébrique alternative au classique calcul des déterminants caractéristiques (théorème de rouché-Fontenet). Elle est notamment utilisée en robotique pour l'établissement du modèle inverse des robots redondants [Dombre, 1989]. Cette méthode est présentée dans l'annexe 2.

#### Principe de résolution

La cible  $\Delta \underline{S}$  étant définie, le problème consiste à trouver le vecteur travail  $\mathbf{W}$  qui va permettre d'engendrer la variation ciblée. Dans la terminologie de l'automatique, il s'agit de trouver la ou les commande(s)  $\mathbf{W}$  menant au résultat  $\Delta \underline{S}$ . La matrice  $\mathbf{C}$  représente les données techniques (gammes et nomenclatures) de tous les processus de production répertoriés. Le cardinal  $m$  de la nomenclature  $\mathbf{O}$  des produits n'étant en général pas égal au cardinal  $n$  de la nomenclature  $\mathbf{T}$  des transformations, la matrice  $\mathbf{C}$  n'est pas carrée. L'utilisation de la pseudo-inverse permet d'inverser le modèle (2) quelles que soient les dimensions de la matrice

d'incidence du processus de transformation généralisé. Nous exposons ici les grandes lignes de l'utilisation que nous faisons de cette méthode.

**Calcul de charge**

L'équation (4.2bis)  $\Delta \overset{\frown}{S} = \overset{\frown}{S}' - \overset{\frown}{S} = \overset{\frown}{C} W$  avec  $\overset{\frown}{C} (m \times n) \quad m \leq n$  conduit, s'il en existe, à l'ensemble des solutions<sup>33</sup> :

$$W(Z) = \overset{\frown}{W} + \overset{\frown}{W}(Z) \quad \text{avec} \quad \overset{\frown}{W} = \overset{\frown}{C}^+ \Delta \overset{\frown}{S} \quad \text{et} \quad \overset{\frown}{W}(Z) = (I - \overset{\frown}{C}^+ \overset{\frown}{C}) Z \quad (4.6)$$

où  $\overset{\frown}{C}^+$  désigne la pseudo-inverse de  $\overset{\frown}{C}$  et  $Z$  représente un vecteur arbitraire de  $\mathfrak{R}^n$ .

La composante  $\overset{\frown}{W} = W(0)$  donne une solution minimisant la norme euclidienne  $W^T W$ . De plus, dans le cas où l'équation (4.2bis) n'est pas inversible,  $W(0)$  est la solution approchée qui minimise l'erreur quadratique  $(\Delta \overset{\frown}{S} - \overset{\frown}{C} W)^T (\Delta \overset{\frown}{S} - \overset{\frown}{C} W)$ .

La composante  $\overset{\frown}{W}(Z)$ , appelée solution homogène ou terme d'optimisation, appartient au noyau de  $\overset{\frown}{C}$  et n'affecte pas la valeur de  $\Delta \overset{\frown}{S}$ . Ce terme peut être utilisé pour satisfaire des contraintes d'optimisation supplémentaires.

**Calcul de besoin**

La variation libre  $\Delta \overset{\frown}{S}$ , issue de (4.2ter), vérifie :  $\Delta \overset{\frown}{S} = \overset{\frown}{C} W(Z)$

Soit, d'après (4.6) :

$$\Delta \overset{\frown}{S} = \overset{\frown}{C} \overset{\frown}{C}^+ \Delta \overset{\frown}{S} + \overset{\frown}{C} (I - \overset{\frown}{C}^+ \overset{\frown}{C}) Z \quad (4.7)$$

$\Delta \overset{\frown}{S}$  détermine la variation des stocks non initialement fixée, suite à la réalisation du travail  $W(Z)$  choisi dans l'ensemble des solutions.

**Conditions d'inversibilité et espace des solutions**

Le calcul de l'inversion de l'équation (4.2bis) dépend du format et du rang de  $\overset{\frown}{C}$ , et donc des propriétés structurelles de la matrice d'incidence du processus de transformation généralisé [Lecompte, 1999].

On rappelle que (théorème de Rouché-Fontenet)

- $m - \text{rg}(\overset{\frown}{C})$  est le nombre de conditions de compatibilité (nombre de déterminants caractéristiques devant être nuls)
- $n - \text{rg}(\overset{\frown}{C})$  est la dimension de l'espace des solutions

Exemple :

Un système incompatible traduit une cible de production inatteignable compte tenu du rapport des poids du réseau de Petri (Figure 4.4).

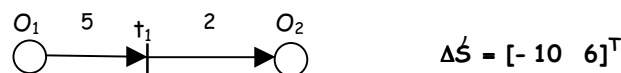


Figure 4.4 - Exemple de cible incompatible

Chaque réalisation de la transformation  $t_1$  consomme 5 objets de type  $O_1$  et produit 2 objets de type  $O_2$ . Du fait des contraintes logiques qui imposent de tirer un nombre entier de fois cette transition, la cible de production  $\Delta \overset{\frown}{S} = [-10 \ 6]^T$  est impossible à atteindre. La solution proposée sera la solution  $W(0)$  qui minimise l'erreur quadratique  $(\Delta \overset{\frown}{S} - \overset{\frown}{C} W)^T (\Delta \overset{\frown}{S} - \overset{\frown}{C} W)$ , soit :  $W(0) = W_1(0) = 2$

<sup>33</sup> nous commentons un peu plus loin les conditions d'inversibilité et l'espace des solutions

Le calcul du travail à réaliser est donc contraint par le rang de  $\hat{C}$  et par la compatibilité du système (2bis). Les différentes situations pouvant se présenter sont résumées ci-après (Tableau 4.1) :

	$\text{rg}(\hat{C}) < m$		$\text{rg}(\hat{C}) = m$	
$\text{rg}(\hat{C}) < n$	(2 bis) COMPATIBLE W(Z) exacte multiple	Cas n°1	W(Z) exacte multiple	Cas n°2
	(2 bis) INCOMPATIBLE W(Z) approchée, multiple			
$\text{rg}(\hat{C}) = n$	(2 bis) COMPATIBLE W(Z) exacte unique	Cas n°3	W(Z) exacte Unique	Cas n°4
	(2 bis) INCOMPATIBLE W(Z) approchée, unique			

Tableau 4.1 - Inversibilité de l'équation (2 bis)

L'interprétation en est la suivante :

Cas n°1 ( $\text{rg}(\hat{C}) < m$ ,  $\text{rg}(\hat{C}) < n$ ) : un certain nombre de contraintes sont redondantes, le système est sous-contraint. Si le système est compatible, la solution est exacte et multiple, sinon approchée et multiple.

Exemple :

Soient le processus de transformation généralisé donné Figure 4.3 et la cible de production qui consiste à produire 60 objets de type  $O_5$  et 30 de type  $O_6$  en laissant invariants les niveaux de stocks d'en-cours.

$$\text{d'où } \Delta \hat{S} = [\Delta S_3 \quad \Delta S_4 \quad \Delta S_5 \quad \Delta S_6]^T = [0 \quad 0 \quad 60 \quad 30]^T \text{ et } \Delta \hat{S} = [\Delta S_1 \quad \Delta S_2]^T$$

$$\text{dans ce cas, } \hat{C} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & 3 & -2 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$m = 4, n = 3 \text{ et } \text{rang } \hat{C} = 2 \text{ donc } \text{rang } \hat{C} < n < m$$

L'inversion du modèle (4.2bis) est conditionnée par la nullité des  $(m - \text{rang } \hat{C})$  déterminants caractéristiques. Il existe donc deux conditions de compatibilité. Dans le cas présent, l'un des deux déterminants caractéristiques est non nul. La condition d'inversibilité n'étant pas vérifiée, la solution est inatteignable. Toutefois, la solution approchée minimisant l'erreur quadratique est

$$W(0) = \hat{C}^+ \Delta \hat{S} = \begin{pmatrix} 17.89 \\ 11.12 \\ 17.89 \end{pmatrix}$$

La mise en œuvre du travail  $W(0)$  conduirait au résultat concernant la variation d'objets ciblée suivante :

$$\Delta \hat{S}(W(0)) = \hat{C} W(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -5.42 \\ 53.67 \\ 38.13 \end{pmatrix}$$

La prise en compte des contraintes logiques (4.3) conduit à rechercher la solution approchée en nombres entiers  $\tilde{W}(0)$  qui minimise l'erreur quadratique  $\|\Delta \hat{S} - \hat{C} \tilde{W}(0)\|$ , soit :

$$\tilde{W}(0) = \begin{pmatrix} 18 \\ 11 \\ 18 \end{pmatrix} \text{ soit } \Delta \hat{S}(\tilde{W}_0) = \hat{C} \tilde{W}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -3 \\ 54 \\ 40 \end{pmatrix}$$

Cas n°2 ( $\text{rg}(\hat{C}) = \hat{m}$ ,  $\text{rg}(\hat{C}) < n$ ) : Il y a plus d'inconnues que d'équations. Le problème est sous-contraint, le système est compatible.

Exemple :

Soient le processus de transformation généralisé donné Figure 4.3 et la cible de production :

$$\Delta \hat{S} = [\Delta S_4 \quad \Delta S_6] = [1 \quad 3] \Rightarrow \Delta \hat{S} = [\Delta S_1 \quad \Delta S_2 \quad \Delta S_3 \quad \Delta S_5]$$

dans ce cas,  $\hat{C} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & -2 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ ,

$\hat{m} = 2$ ,  $n = 3$  et  $\text{rang } \hat{C} = 2$  donc  $\text{rang } \hat{C} = \hat{m}$  et  $\text{rang } \hat{C} < n$

Il n'y a aucune condition de compatibilité. La dimension de l'espace des solutions est égale à un. La solution est multiple, d'ordre de multiplicité 1.

La solution (4.6) est  $W = [Z_1 \quad 1 \quad 1]$  (solution exacte, multiple)

Cas n°3 ( $\text{rg}(\hat{C}) < \hat{m}$ ,  $\text{rg}(\hat{C}) = n$ ) : Il y a plus d'équations que d'inconnues. Le problème est sur-contraint. La solution, si le système est compatible, est exacte et unique, sinon approchée et unique.

Exemple :

Soient le processus de transformation généralisé donné Figure 4.3 et la cible de production :

$$\Delta \hat{S} = [\Delta S_1 \quad \Delta S_3 \quad \Delta S_5 \quad \Delta S_6] = [-3 \quad 1 \quad 3 \quad 3] \Rightarrow \Delta \hat{S} = [\Delta S_2 \quad \Delta S_4]$$

dans ce cas,  $\hat{C} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ ,

$\hat{m} = 4$ ,  $n = 3$  et  $\text{rang } \hat{C} = 3$  donc  $\text{rang } \hat{C} = n$  et  $\text{rang } \hat{C} < \hat{m}$

Il existe une condition de compatibilité car ( $\hat{m} - \text{rang } \hat{C} = 1$ ). L'inversion du modèle (4.2bis) est conditionnée par la nullité d'un seul déterminant caractéristique. Dans le cas présent, le déterminant caractéristique est non nul. La condition d'inversibilité n'étant pas vérifiée, la solution est inatteignable. Compte tenu des poids du réseau de Petri, on pouvait prédire que le système est incompatible et la cible de production inatteignable.

Comme dans le cas n°1, il est possible de calculer une solution approchée qui minimise l'erreur quadratique.

Cas n°4 ( $\text{rg}(\hat{C}) = \hat{m}$ ,  $\text{rg}(\hat{C}) = n$ ) : Il y a autant d'objets à réaliser que de transformations à effectuer. La matrice  $C$  est carrée régulière, le système est inversible (système de Cramer). La solution  $W(Z)$  est donc exacte et unique.

Exemple :

Soient le processus de transformation généralisé donné Figure 4.3 et la cible de production :

$$\Delta \hat{S} = [\Delta S_3 \quad \Delta S_5 \quad \Delta S_6] = [0 \quad 3 \quad 3] \Rightarrow \Delta \hat{S} = [\Delta S_1 \quad \Delta S_2 \quad \Delta S_4]$$

dans ce cas,  $\hat{C} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ ,

$\hat{m} = 3$ ,  $n = 3$  et  $\text{rang } \hat{C} = 3$  donc  $\text{rang } \hat{C} = n$  et  $\text{rang } \hat{C} = \hat{m}$

Il n'y a aucune condition de compatibilité, la solution est exacte. La dimension de l'espace des solutions est

égale à zéro. La solution est unique.

La solution (4.6) est  $W = [1 \ 1 \ 1]$  (solution exacte, unique).

**Conclusion**

La résolution du problème besoin/charge par la méthode de la pseudo-inverse permet d'explicitier l'ensemble de toutes les solutions  $W$  possibles et leur incidence sur les stocks non ciblés. Toutefois, cette méthode de résolution ne permettant pas d'intégrer de prime abord les contraintes logiques et physiques citées précédemment (§3.2), un tri des solutions devra être effectué a posteriori afin de restreindre l'ensemble des solutions aux solutions admissibles. En outre, les solutions  $W$  obtenues étant réelles, des contraintes d'intégrité devront être ajoutées afin de prendre en compte le caractère entier des solutions. A cet effet, un algorithme polynomial d'exploration de l'arborescence des solutions peut entrer en jeu pour le tri des solutions.

Les différentes variantes du processus de résolution du modèle (4.2bis, 4.2ter) sous ou sans contraintes sont schématisées ci-après (Figure 4.5a, 4.5b, 4.5c).

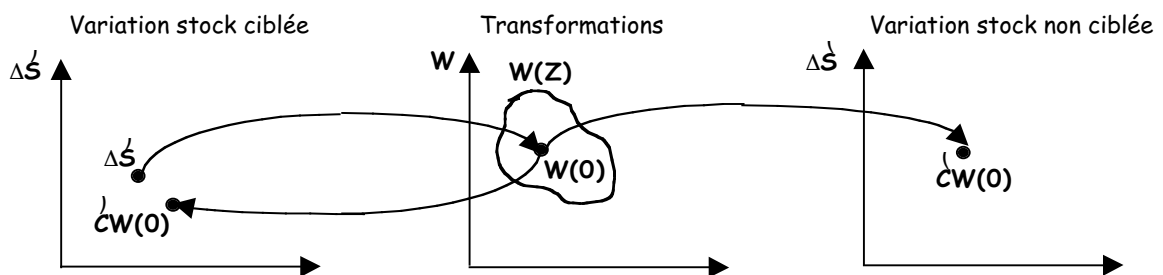


Figure 4.5a - Système non compatible (solution approchée)

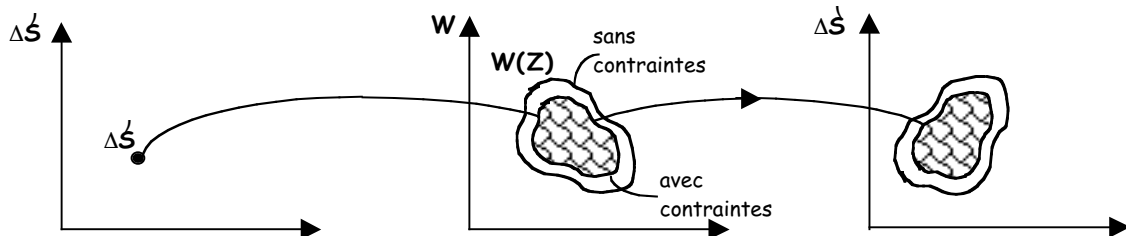


Figure 4.5b - Système compatible (solutions admissibles)

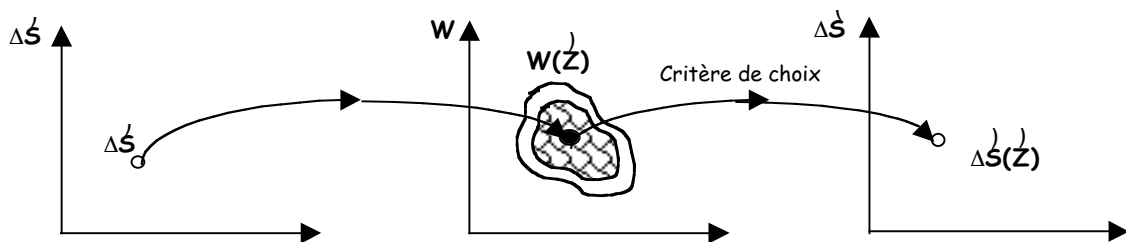


Figure 4.5c - Système compatible (solution optimale)

Les avantages de notre formalisation sont :

- de fournir un test de cohérence de la cible de production. En effet, l'inversion du modèle (4.2) est conditionnée par la nullité des  $m - rg(C)$  déterminants caractéristiques,
- de s'appuyer sur un formalisme analytique (pseudo-inversion) disponible dans des bibliothèques logicielles (par exemple MATLAB).

### 3.4 Problématique d'optimisation

Les techniques d'optimisation permettent de prouver l'existence ou non d'au moins une solution et de trouver parmi un ensemble de solutions la (ou les) solution(s) optimale(s) en référence à un critère donné.

La résolution optimale du système  $\Delta S = CW$  demeure hors du champ de notre étude. Elle suppose en effet l'énoncé d'un critère de choix exprimant une stratégie bien déterminée de gestion et l'expression de contraintes complémentaires spécifiques à chaque cas particulier. Il ne nous semble donc pas que ce sujet puisse être traité de manière générique sans recourir à des hypothèses simplificatrices et extrêmement réductrices eu égard aux applications.

L'objet de ce paragraphe est simplement de raccrocher à notre modèle les outils d'optimisation disponibles.

#### 3.4.1 Contraintes

##### Contraintes égalité

$$- \bar{A}S = CW \text{ ou } \sum_{j=1}^n c_{ij}w_j = \delta_i s_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (P1)$$

$$- \bar{A}S = CW \text{ ou } \sum_{j=1}^n c_{ij}w_j = \delta_i \bar{s}_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (P2)$$

$$- m + \bar{m} = m$$

Les équations d'état (P1) et (P2) traduisent l'évolution des stocks bilan du processus de production. Il s'agit d'équations de conservation de la matière.

##### Contraintes inégalité

$$- \bar{A}S_a \leq 0 \text{ ou } \sum_{j=1}^n c_{ij}w_j \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, \text{card } O_a \quad (P3)$$

$$- \bar{A}S_c \geq 0 \text{ ou } \sum_{j=1}^n c_{ij}w_j \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, \text{card } O_c \quad (P4)$$

$$- s_i \geq \underline{s}_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (P5)$$

$$- s_i \leq \bar{s}_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (P6)$$

Les contraintes (P3) et (P4) traduisent respectivement les contraintes physiques d'évolution des stocks en matières premières (objets consommés) et en produits finis (objets sortants). Les contraintes (P5) et (P6) expriment le fait que les stocks sont bornés pour des raisons physiques ou de gestion (stocks planchers et plafonds).

$$- S, S' \in \mathbb{N}^m, W \in \mathbb{N}^n \quad (P7)$$

La contrainte (P7) traduit le domaine d'appartenance des stocks et travaux. Elle rappelle que chaque composante du vecteur stock généralisé est un entier naturel, ainsi que chaque composante du vecteur travail généralisé.

#### 3.4.2 Critère d'optimisation générique

Les contraintes génériques précédentes, augmentées des contraintes éventuelles propres à chaque cas, vont réduire l'ensemble des solutions admissibles<sup>34</sup>  $W(Z)$ . On pourra dans cet ensemble choisir la ou les solution(s) optimisant un critère donné, impliquant le travail requis et/ou les variations de stock associé, par exemple sous forme quadratique :

<sup>34</sup> si c'est ensemble est vide, il faudra soit chercher à minimiser une distance de  $\Delta S$  à  $CW$  soit relaxer une contrainte de stock (P5), (P6), soit modifier l'objectif de production (P1).



$$J = (\Delta S)^T E (\Delta S) + W^T F W \quad \text{avec } E \text{ et } F \text{ matrices symétriques définies positives} \quad (4.8)$$

On trouvera dans [Zheng, 2000] la résolution analytique de ce problème d'optimisation.

### 3.4.3 Approches d'optimisation

Nous rappelons les principales approches utilisables pour résoudre notre problème d'optimisation combinatoire en nombres entiers.

#### Programmation linéaire

L'algorithme du SIMPLEXE conçu par Dantzig, (Dantzig, 1947) est très utilisé pour résoudre des problèmes de programmation linéaire. L'idée de cet algorithme est de passer itérativement d'un sommet du polyèdre des contraintes à un sommet adjacent de façon à augmenter la valeur de la fonction à optimiser jusqu'à trouver un sommet où l'optimum est atteint.

Sous réserve de convexité du polyèdre et de linéarité du critère on peut se contenter de "monter suivant les arêtes du polyèdre de sommet en sommet" pour trouver le maximum. Les solutions obtenues par la mise en œuvre de cet algorithme sont en nombres réels.

Cet algorithme contient deux phases :

- Une procédure d'initialisation qui permet de déterminer les coordonnées du premier sommet admissible. La réussite de cette procédure permet de conclure à l'existence d'au moins une solution.
- une procédure itérative qui calcule la solution qui donne au critère sa meilleure valeur. Une itération consiste à passer d'un sommet à l'autre le long d'une arête de l'espace des solutions.

La complexité de l'algorithme du SIMPLEXE est de  $1,5 \alpha$ ,  $\alpha$  étant le nombre de contraintes. Cette méthode est numérique, mais son utilisation est facilitée par l'existence de bibliothèques et outils de programmation tels CPLEX de ILOG, XPRESS-MP de DASH, etc.

Mais notre problème d'optimisation est en nombres entiers. Un problème de programmation linéaire en nombres entiers est un problème de programmation linéaire standard auquel des contraintes d'intégrité ont été rajoutées. Les temps des algorithmes de résolution de ce type de problèmes sont plus importants comparés aux précédents. Le PYSIMPLEX<sup>1</sup> fournit des outils de programmation symbolique permettant de résoudre et optimiser des systèmes d'équations et/ou d'inéquations linéaires. Il comprend deux modules : un module d'optimisation basé sur l'algorithme du SIMPLEXE et un module filtre pour l'analyse et l'optimisation de modèles linéaires.

Bien qu'il existe des algorithmes polynomiaux (solveurs de type PREMIUM, QUADRATIC, LARGE SCALE LP)<sup>2,3</sup> pour résoudre les problèmes de programmation linéaire en nombre entiers, ceux-ci peuvent être NP-complet, on ne connaît alors pas d'algorithme polynomial pour le résoudre.

#### Les procédures par séparation et évaluation progressive

Les Procédures par Séparation et Evaluation Progressive (PSEP) s'appliquent à la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire pour lesquels le nombre de solutions envisageables est important. Ils s'appliquent en particulier à la résolution de problèmes de programmation linéaire en nombres entiers pour lesquels on peut définir la notion de solutions réalisables, c'est-à-dire satisfaisant les contraintes. Ces procédures d'exploration, parfois appelés méthodes arborescentes d'optimisation [Carlier, 1982], consistent à énumérer explicitement l'ensemble des solutions. Ces procédures sont caractérisées comme suit :

- Un principe de séparation permet de partitionner les problèmes en sous-problèmes de dimension plus faible et donc moins complexes. La décomposition est réalisée tant qu'il n'est pas possible de conclure sur l'un des sous-ensembles engendrés.

<sup>1</sup> <http://www.pythonpros.com/arw/pysimplex/>

<sup>2</sup> <http://www.frontsys.com/algomip.htm>

<sup>3</sup> Ces solveurs utilisent tous la méthode du Branch and Bound

- Un principe d'évaluation permet d'estimer la qualité de chaque sous-ensemble de solutions vis-à-vis du critère à optimiser. Il guide, par le calcul d'une borne inférieure de la solution optimale du sous-problème considéré, la construction de l'arborescence en évitant un développement inutile de sous-ensemble considéré.
- Une borne inférieure de la solution optimale du sous-ensemble considéré.
- Une stratégie de développement indiquant les sous-ensembles à analyser et l'ordre d'analyse.

La PSEP peut intervenir en aval de l'algorithme du SIMPLEXE donnant la solution optimale en variables réelles.

#### 3.4.4 Conclusion sur les approches d'optimisation

L'utilisation conjointe de l'algorithme du simplexe et d'une procédure par séparation et évaluation progressive permettra de caractériser les solutions  $\mathbf{W}$  optimales au sens du critère choisi. L'incidence de ces solutions sur les stocks non ciblés est obtenue en utilisant l'équation (2ter). La détermination des solutions  $\mathbf{W}$  intégrant uniquement les contraintes relatives aux stocks ciblés, il faudra vérifier que la solution obtenue ne viole pas les contraintes relatives aux stocks non ciblés.

L'avantage de l'utilisation de la cascade SIMPLEXE/PSEP est d'obtenir les solutions  $\mathbf{W}$  en nombres entiers et d'intégrer aussi bien des contraintes de type égalité qu'inégalité.

Son inconvénient majeur est que la solution optimale trouvée  $\mathbf{W}$  risque de violer les contraintes sur les stocks libres. En outre, il est à noter que la fonctionnelle de coût  $J$  que l'on cherche à optimiser peut être multi-critère. Il conviendrait donc pour résoudre ce problème d'utiliser une méthode du SIMPLEXE qui soit multi-objectif et donc plus compliquée à mettre en œuvre. De plus, lorsque l'on s'intéresse à des problèmes de grande dimension (nombre de variables transformation/objet supérieur à 10), on peut s'attendre à ce que les méthodes itératives exactes telles que la programmation dynamique, les méthodes par séparation et évaluation progressives ne réussissent pas à donner la solution optimale... faute de temps. On applique alors des méthodes heuristiques censées donner en un temps raisonnable une bonne approximation de la solution. Enfin, les méthodes d'optimisation ne satisfont pas à notre objectif d'énumération explicite de toutes les solutions.

Au vu des inconvénients de la méthode présentée ci-dessus, nous préférons utiliser une méthode de résolution basée sur la pseudo-inversion qui permet de circonscrire l'espace des solutions admissibles.

D'autres approches d'optimisation, peuvent être également envisagées, telles que la Programmation Dynamique. Il est clair que l'ensemble des méthodes analytiques ou numériques d'optimisation ne sont réalistes au plan pratique que si le nombre de données reste limité, ce qui milite en faveur d'une large distribution des décisions et de la manipulation de données agrégées.

## 4 CONCLUSION

A partir d'un carnet de commande libellé en produits (sur un horizon laissé jusqu'ici implicite), nous avons proposé un modèle support au processus décisionnel devant conduire conjointement au calcul des besoins et au calcul de la charge de travail.

Ce processus décisionnel comporte des phases de calcul modélisées et des espaces offerts à l'expression d'une stratégie (politique de prélèvement et de régénération de stocks) et à l'expertise du décideur au travers de critères à optimiser. Ce processus décisionnel associé au calcul de besoin/calcul de charge est résumé ci-après (Figure 4.8).

Notre modèle de données est générique, instanciable à chaque centre de décision, et détermine un cadre de décision caractérisé par :

- la nomenclature des objets et des transformations connues du centre de décision,
- le processus généralisé de transformation, défini par la matrice d'incidence  $\mathbf{C}$ ,
- l'équation généralisée de production  $\Delta \mathbf{S} = \mathbf{C} \mathbf{W}$  qui régit tout scénario quantitatif de production ou qui, si l'on se préfère, constitue un jeu de contraintes égalité,
- un jeu de contraintes supplémentaires physiques et logiques restreignant l'espace des solutions admissibles.

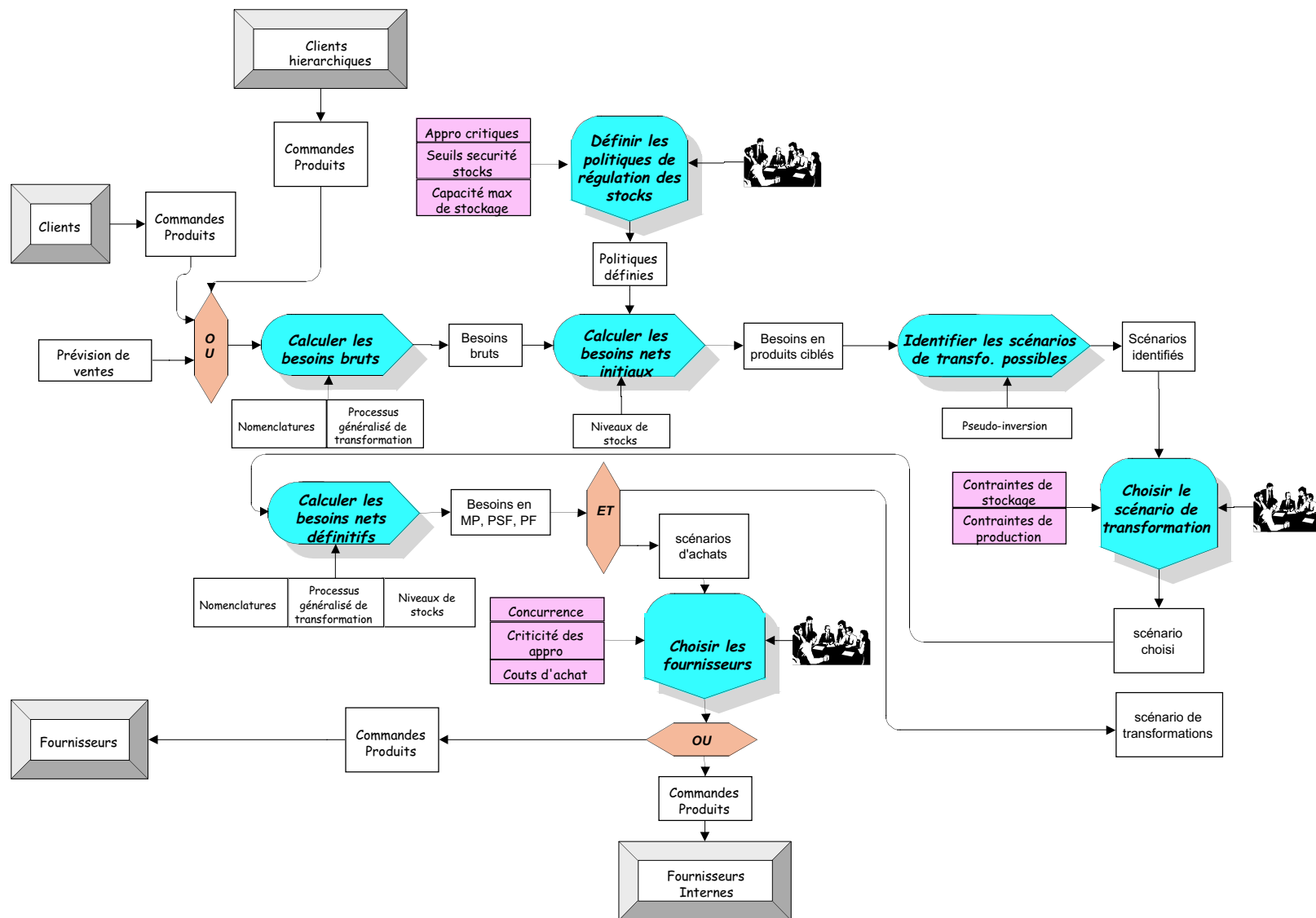


Figure 4.8 - Calcul besoin/charge

La décision elle-même intervient :

- dans la définition de la cible  $\Delta S$  qui permet d'exprimer tous les effets escomptés de la production sur les stocks, en prenant en compte les alternatives de négoce et de gestion des stocks d'en-cours,
- dans le choix d'une solution optimale  $W(Z)$  au sein de l'espace des solutions admissibles, en référence à un critère à définir, notamment sur des considérations économiques.

Enfin, les sorties du processus décisionnel sont d'une part, la détermination de la variation non ciblée  $\Delta S$  des stocks, notamment des approvisionnements  $\Delta Sa$  en composants, et, d'autre part, l'évaluation de la charge de travail  $W(Z)$  dans ses diverses variantes, qui fournit au centre de décision l'ensemble des solutions admissibles vis-à-vis de l'objectif de production. Une procédure d'optimisation, non modélisée - et selon nous non modélisable de façon générique doit alors être mise en œuvre. Celle-ci conduira à instancier le vecteur paramètre  $Z$ , en intégrant des critères spécifiques au centre de conduite. Dès lors, la variation de la composante non initialement imposée  $\Delta S$  du stock généralisé est calculable. Ce raisonnement permet de dégager les propriétés invariantes de la production soumise aux contraintes de processus, sans préjuger ni de l'organisation, ni des capacités des ressources de production. C'est l'objet du chapitre suivant que de poursuivre le raisonnement en impliquant les différentes ressources mobilisables.

## Chapitre 5 Allocation de charge

Il s'agit ici d'impliquer les moyens de transformation (ressources) disponibles dans le processus de décision.

Nous avons montré au chapitre précédent qu'un carnet de commandes spécifié en termes de produits à fabriquer pouvait être réalisé de différentes façons pour des raisons à la fois techniques<sup>35</sup> et stratégiques<sup>36</sup>. Le choix d'un scénario de production permet de calculer la quantité de travail  $W(z)$ , à laquelle doivent être ajoutées les éventuelles commandes de sous-traitance de travaux confiées par voie hiérarchique ou coopérative (Figure 5.1).

Soit en définitive  $W(H)$  la quantité globale de transformations à réaliser sur l'horizon  $H$ . L'objectif est d'assurer une allocation pertinente de ces travaux aux ressources internes et/ou externes dont le centre peut disposer, et de séquencer ces différentes transformations en rapport aux processus de transformation. Nous ne traitons pas dans ce chapitre la décision d'allocation en elle-même, pour laquelle différents algorithmes sont disponibles. Notre objectif est de formaliser les règles de cohérence permettant, selon les caractéristiques des ressources, de garantir la faisabilité des scénarios d'allocation envisagés par le décideur.

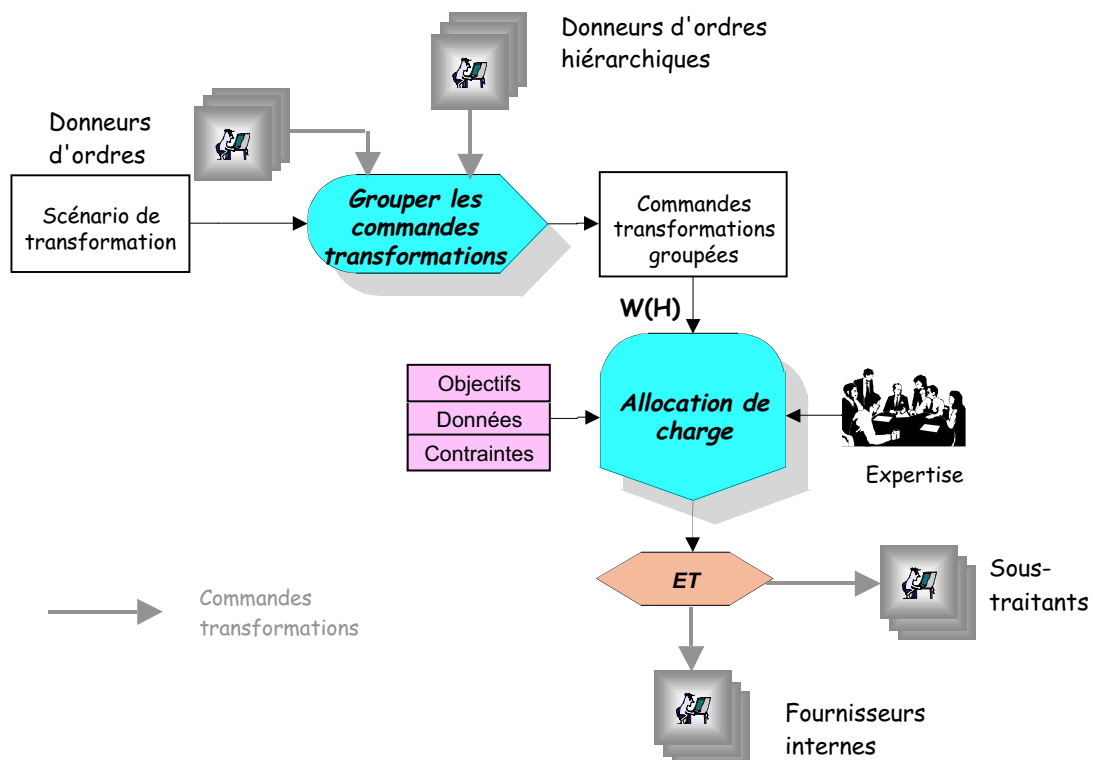


Figure 5.1 - Allocation de charge

<sup>35</sup> La multiplicité du nombre des solutions est une conséquence de la théorie du rang et des conditions d'inversibilité de la matrice  $C$  caractéristique du processus de transformation généralisé.

<sup>36</sup> Politiques de régulation des stocks, paramètre d'optimisation  $Z$ , ...

Le problème d'allocation des travaux est indissociable de la logistique d'approvisionnement des ressources qui auront à réaliser ces travaux. Le souci de coordonner le processus de circulation et de transformation des matières dans sa continuité constitue la base du cahier des charges des systèmes d'organisation logistique d'entreprise. La planification logistique se décompose, à l'image de la planification de la production, en :

- une planification stratégique concernant l'organisation du réseau logistique (choix des transporteurs, gestion des emplacements de stockage, ...)
- une planification tactique permettant d'identifier les paramètres logistiques internes et externes issus de la prise de décision à moyen terme (taille des lots de transport, suivi des coûts de transport,...),
- une planification opérationnelle qui contribue au déploiement optimal des ressources et moyens alloués au service de la demande. Elle peut être proposée sur la base d'une articulation de cinq modules spécifiques largement interdépendants : le système de prévision de la demande, la planification des opérations de production, la planification des opérations de distribution physique (logistique commerciale qualifiée de logistique aval), la planification des approvisionnements (logistique industrielle qualifiée de logistique amont), le système d'évaluation des performances du système logistique [Mathe, 1998].

Nous supposons prises les décisions à caractère stratégique et tactique pour nous focaliser sur la planification logistique opérationnelle et plus particulièrement sur l'évaluation des performances du système logistique basée sur le respect des dates de livraisons des produits attendus par le consommateur (contraintes production/transport) et des disponibilités et capacités des ressources de transport et ce sous le couvert de règles de cohérence.

Nous présentons dans un premier temps une typologie des ressources de transformation et de transport ainsi que les tableaux de bord nécessaires au centre de conduite pour le pilotage du système opérant dont il a la charge. Ces tableaux de bord regroupent l'ensemble des informations et indicateurs relatifs aux modalités d'exécution des transformations par les ressources de transformation et des transports par les ressources de transport. L'ensemble des règles de cohérence est présenté ensuite.

## 1 MODELISATION DES RESSOURCES

### 1.1 Définition des ressources

Les moyens de production peuvent, dans leur variété physique, être fonctionnellement classés en trois types:

- les moyens de transformation, qualifiés traditionnellement et selon le cas de machines ou d'opérateurs humains,
- les moyens de transports nécessaires à l'écoulement des flux matériels entre les lieux de transformation,
- les espaces de stockage (magasins, stocks d'en-cours) nécessaires à l'adaptation cinématique des flux.

Les espaces de stockage sont des moyens *passifs* caractérisés par une capacité physique déterminant une population maximale d'objets. Nous avons déjà pris en compte ces caractéristiques dans notre modèle, sous la forme de contraintes sur la valeur maximale de chaque composante du vecteur  $S$ .

Il s'agit donc ici de modéliser les moyens *actifs* de transformation d'une part et de transport d'autre part. Nous utiliserons les termes de "ressources de transformation" et "ressource de transport" pour désigner ces seuls<sup>37</sup> moyens, en leur conférant toutefois un sens élargi :

- une ressource de transformation est une organisation capable d'apporter une valeur ajoutée matérielle au produit. Il peut s'agir d'un atelier, d'une cellule de production, etc. , en d'autres termes d'une ressource *virtuelle* identifiée au travers de considérations fonctionnelles et non pas géographiques. Le cas d'une machine ou d'un opérateur est un cas particulier de la définition précédente, rejoignant la notion de ressource *réelle*,
- une ressource de transport est un ensemble de moyens physiques capables d'écouler un flux matériel d'une ressource de transformation à une autre. Ici encore, la ressource est virtuelle, dans la mesure où seul importe le potentiel d'écoulement d'un canal de transport reliant un lieu de transformation à un

---

<sup>37</sup> à l'exclusion donc des ressources de stockage et de tout autre type de ressource (temps, énergie)

autre, sans préjuger ni de la nature, ni du nombre de moyens mobiles de transport (conteneurs, camions, etc,...).

*Remarque : ces définitions sont en accord avec le paradigme de réseau sous-jacent à tout système distribué de production et doivent être considérées à une échelle spatiale donnée (Figure 5.2). Par exemple, à l'échelle du réseau d'entreprise, les ressources de transformation (entreprises) sont ponctuelles et les ressources de transport écoulent les flux physiques inter-entreprises. A moindre échelle toutefois, on peut adopter une vue interne de l'entreprise, ou vue de "niveau inférieur", selon laquelle l'entreprise considérée n'apparaît alors non plus comme un point de transformation, mais comme un nouveau réseau mettant en scène des ressources de transformation et de transport propres à la nouvelle échelle.*

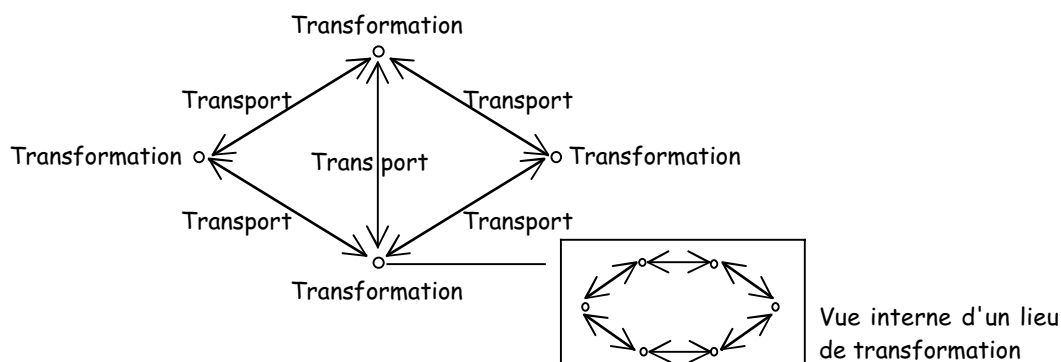


Figure 5.2 - Echelle de représentation des systèmes de production réticulaires

## 1.2 Caractérisation des ressources de transformation

### 1.2.1 Principes de modélisation

Différentes typologies de ressources sont proposées dans la littérature [Lopez, 1991], [Chu, 1995], [Aldanondo, 1992], étant entendu que ces définitions s'appliquent à des ressources réelles (opérateurs et machines). Le plus couramment, une ressource est qualifiée de :

- **renouvelable** si, ayant réalisé une transformation, elle demeure disponible pour d'autres ; **consommable** si le nombre d'opérations réalisables est limité,
- **disjonctive** ou mono-processeur si elle ne peut réaliser qu'une transformation à la fois ; **cumulative** dans le cas contraire,
- **à regroupement** si elle est capable de traitements collectifs (cas d'un traitement thermique par exemple).

Pour les besoins de notre modélisation, il importe de caractériser l'exploitabilité des ressources de transformation. Nous retenons, en les généralisant aux ressources virtuelles, les notions de polyvalence et de capacité cumulée sur lesquelles sont fondés les travaux de Zolghadri [Zolghadri, 1998] :

- la **polyvalence** caractérise pour une ressource donnée la variété des transformations réalisables,
- la **capacité** définit la quantité de travail réalisable sur une période donnée.

Nous allons caractériser les quantités de travail qu'une ressource virtuelle est capable de réaliser au regard de la variété des transformations, et ce sur une durée  $h^{38}$  implicite. Nous parlerons dans le cas général de *travail hétérogène*  $W = [W_1 \dots W_n]^T$  pour désigner l'activité (ou "charge") d'une ressource et de *travail j-homogène*  $W = [0 \dots W_j \dots 0]$  pour désigner le cas particulier où la charge n'implique que la seule transformation  $j$ .

### 1.2.2 Caractérisation d'une ressource virtuelle de transformation

Nous considérons le cas général d'une ressource de transformation polyvalente, les cas particuliers de ressource de transformation monovalente et de ressource de transformation disjonctive dérivant du cas

<sup>38</sup> Nous cherchons donc à évaluer les travaux cumulés réalisables sur une durée  $h$ .

général. Une typologie des ressources de transformation peut selon nous se limiter à deux classes : *ressources de transformation à travaux indépendants* et *ressources de transformation à travaux couplés* qui expriment deux comportements quant au mixage de travaux homogènes.

Dans ce qui suit, nous désignons par :

- $\dot{W}_{jr}(h)$  la charge j-homogène, cumulée sur la durée h, allouée à la ressource r,
- $\tilde{W}_{jr}(h)$  la charge j-homogène, cumulée sur la durée h, qu'il reste possible d'allouer à la ressource r, ou charge disponible.

### Ressource de transformation à charges indépendantes

Une ressource à charges indépendantes est capable, sur la durée h, de superposer les transformations homogènes :

$$\dot{W}_r(h) = [\dot{W}_{1r}(h) \ \dots \ \dot{W}_{jr}(h) \ \dots \ \dot{W}_{nr}(h)]^T$$

sans contraintes mutuelles, ce qui suppose que ces transformations ne partagent aucun moyen commun : équipement, énergie, temps, etc.

- La figure 5.3a illustre l'activité d'une telle ressource.
- L'exploitabilité de la ressource pour la durée h peut être représentée (Figure 5.3b) dans un espace de dimension n = card T.

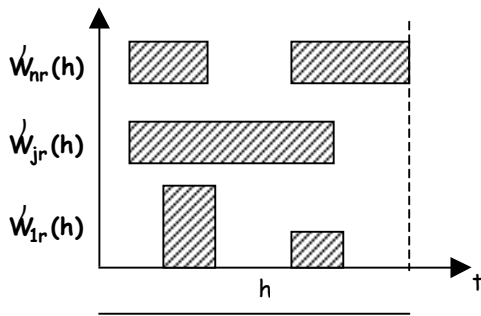


Figure 5.3a - Activité d'une ressource à charges indépendantes

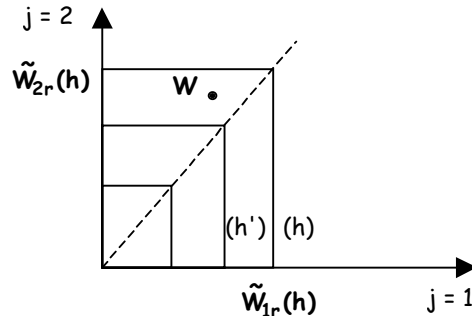


Figure 5.3b - Hyperplan de charge d'une ressource à charges indépendantes

Une charge hétérogène W peut être allouée à la ressource r sur la durée h dès lors que

$$W_j \leq \tilde{W}_{jr}(h) \quad \forall j = 1, \dots, n$$

plus simplement noté:

$$W \leq \tilde{W}_r(h) \quad \text{avec} \quad \tilde{W}_r(h) = [\tilde{W}_{1r}(h) \ \dots \ \tilde{W}_{nr}(h)]^T \quad (5.1)$$

Remarques :

Le diagramme d'activité (Figure 5.3a) fait apparaître un travail homogène comme une surface obtenue par intégration dans le temps d'une puissance moyenne [Zolghadri, 1998] propre au type j.

La Figure 5.3b est un hyperplan de charge (ici représenté pour n = 2), indiquant la faisabilité d'une charge hétérogène dans un temps donné. On voit sur cette figure que la charge considérée W est réalisable dans la durée h, mais pas dans la durée h' (h' < h).

### Ressource de transformation à charges couplées

Lorsque les travaux mis en œuvre par une ressource partagent des moyens communs (équipements, énergie, temps, etc.), les travaux homogènes ne sont plus indépendants et il faut fournir un modèle de mixage. Les ressources disjonctives (partage du temps) et toutes ressources cumulatives partageant une source d'énergie limitée, un personnel limité, etc. relèvent notamment de cette catégorie.



Examinons (Figure 5.4a) l'activité d'une ressource disjonctive bivalente ( $n = 2$ ). Les travaux homogènes  $\dot{W}_{jr}$   $j = 1, \dots, n$  peuvent être considérés comme la résultante d'une puissance opératoire [Zolghadri, 1998] moyenne  $P_{jr}$  développée sur une durée  $\delta_j$  :

$$\dot{W}_{1r} = P_{1r}\delta_1 \quad \text{et} \quad \dot{W}_{2r} = P_{2r}\delta_2$$

sous la contrainte :  $\delta_1 + \delta_2 = h$

d'où :  $\frac{\dot{W}_{1r}}{hP_{1r}} + \frac{\dot{W}_{2r}}{hP_{2r}} = 1$  ou encore  $\frac{\dot{W}_{1r}}{\tilde{W}_{1r}(h)} + \frac{\dot{W}_{2r}}{\tilde{W}_{2r}(h)} = 1$

Une charge  $W$  peut donc être allouée à la ressource  $r$  sur une durée  $h$  dès lors que :

$$W^T(h)\tilde{W}_r^{-1}(h) \leq 1 \quad \text{avec} \quad \tilde{W}_r^{-1}(h) = \left[ \frac{1}{\tilde{W}_{1r}(h)} \quad \dots \quad \frac{1}{\tilde{W}_{jr}(h)} \quad \dots \quad \frac{1}{\tilde{W}_{nr}(h)} \right]^T \quad (5.2)$$

Le modèle (5.2) définit la capacité de la ressource  $r$  compte tenu des contraintes de disjonction. Il lui correspond un hyperplan de charge (Figure 5.4b). A titre d'exemple, la charge  $W$  représentée sur cette figure est réalisable dans la durée  $h$ , et non pas dans la durée  $h'$ , ( $h' < h$ ).

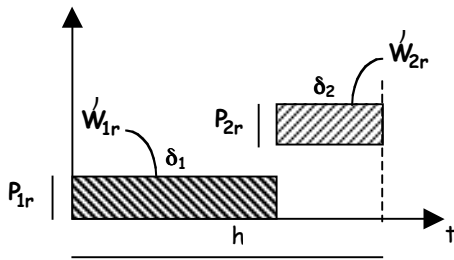


Figure 5.4a - Activité d'une ressource disjonctive

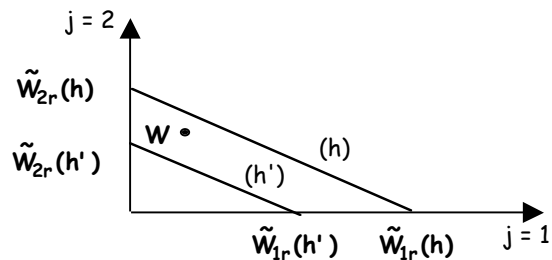


Figure 5.4b - Hyperplan de charge d'une ressource disjonctive

La situation est similaire dans le cas d'une ressource non disjonctive dont le cumul des activités est contraint par le partage de moyens communs. En effet, les capacités homogènes affectées  $\dot{W}_{1r}(h)$ ,  $\dot{W}_{2r}(h)$  ne sont pas indépendantes et il est nécessaire de connaître la loi de couplage. En première approximation, nous retenons un couplage linéaire [Meier, 1989], mais tout autre caractéristique peut être envisagée.

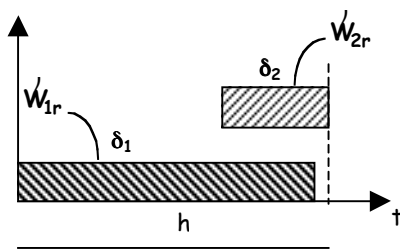


Figure 5.5a - Activité d'une ressource à charges couplées

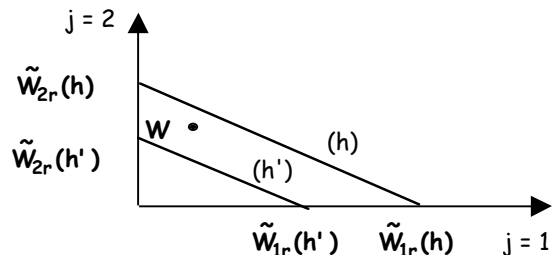


Figure 5.5b - Hyperplan de charge d'une ressource à charges couplées

Ici encore la charge hétérogène  $W$  peut être allouée à la ressource  $r$  sur la durée  $h$  dès lors que :

$$W^T \tilde{W}_r^{-1}(h) \leq 1$$

Remarque : chaque composante  $\frac{1}{\tilde{W}_{jr}(h)}$  du vecteur  $\tilde{W}_r^{-1}(h)$  représente la durée moyenne d'exécution d'un exemplaire de la transformation  $j$

En définitive, une charge de travail  $W$  est allouable à une ressource  $r$  sur la durée  $h$  à la condition :

- $W \leq \tilde{W}_r(h)$  s'il s'agit d'une ressource à charges indépendantes,
- $W^T \tilde{W}_r^{-1}(h) \leq 1$  s'il s'agit d'une ressource à charges couplées. (5.3)

Remarque : il est à noter que le modèle à charges couplées est exact dans le cas d'une ressource de transformation disjonctive, approché dans le cas d'une ressource de transformation cumulative.

### 1.2.3 Délai opératoire

Les capacités des ressources ont été définies dans ce qui précède en tant que quantités de transformations réalisables dans un temps donné. A cette caractérisation *synchrone* correspond une approche *asynchrone* traduisant le délai  $d_r(W)$  nécessaire à la réalisation par la ressource  $r$  d'un travail hétérogène  $W = [W_1 \dots W_n]$ .

#### Ressource de transformation à charges indépendantes

Le délai  $d_r(W)$  nécessaire à la ressource  $r$  pour réaliser le travail hétérogène  $W$ , noté simplement  $d$  pour cette démonstration, vérifie pour  $n = 2$  (ressource bivalente) :

$$\text{Cas (1)} \begin{cases} W_1 \leq \tilde{W}_{1r}(d) \\ W_2 \leq \tilde{W}_{2r}(d) \end{cases} \quad \text{ou} \quad \text{Cas (2)} \begin{cases} W_1 \leq \tilde{W}_{1r}(d) \\ W_2 = \tilde{W}_{2r}(d) \end{cases}$$

avec  $\tilde{W}_{1r}(d)$  et  $\tilde{W}_{2r}(d)$  disponibilités homogènes sur la durée  $h = d$ .

Par un principe d'homothétie qui veut que la capacité d'une ressource est proportionnelle au temps disponible, on déduit des relations précédentes (Figure 5.6) :

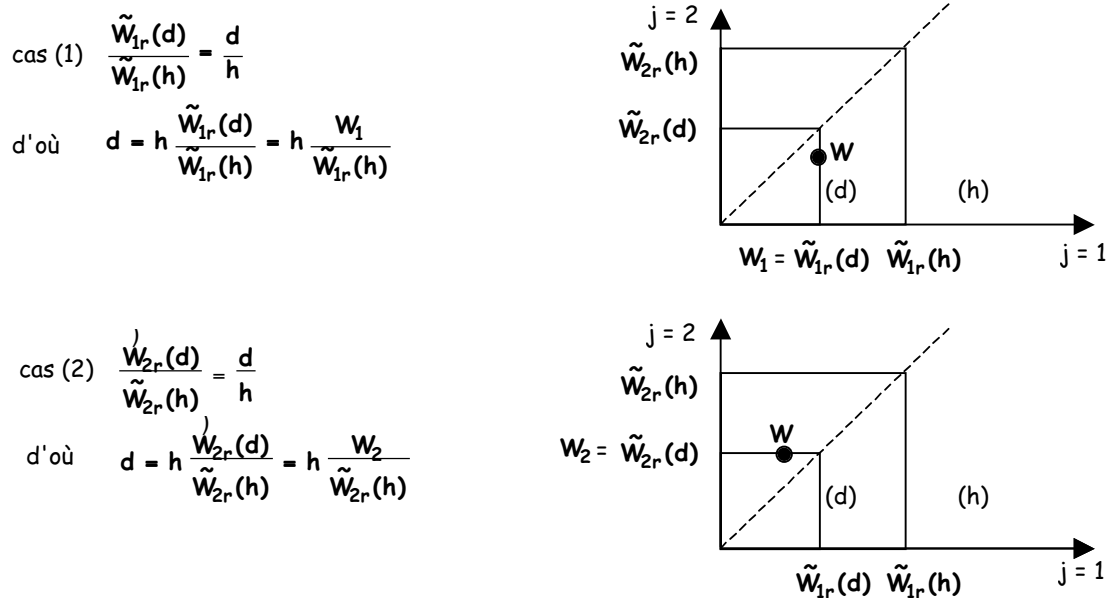


Figure 5.6 - Recherche du délai opératoire pour un travail  $W$  (ressources à charge indépendantes)

Le délai opératoire pour réaliser le travail hétérogène  $W$  est donc :

$$d_r(W) = h \max_j \frac{W_j}{\tilde{W}_{jr}(h)} \quad d_r(W) \leq h \tag{5.4}$$

### Ressource de transformation à charges couplées

Ici encore, il faut rechercher l'horizon  $d$  tel que la capacité hétérogène de la ressource sur cet horizon soit suffisante pour absorber le travail  $W$ .

Par un principe d'homothétie, le travail  $W$  est proportionnel au travail  $W'$  (Figure 5.7) réalisable sur la durée  $h$ , d'où :

$$W = \frac{d}{h} W' \quad \text{avec} \quad W'^T \tilde{W}_r^{-1}(h) = 1$$

et par suite :

$$\frac{h}{d} W^T \tilde{W}_r^{-1}(h) = 1$$

$$\text{soit} \quad d_r(W) = h \cdot W^T \tilde{W}_r^{-1}(h), \quad d_r(W) \leq h \tag{5.5}$$

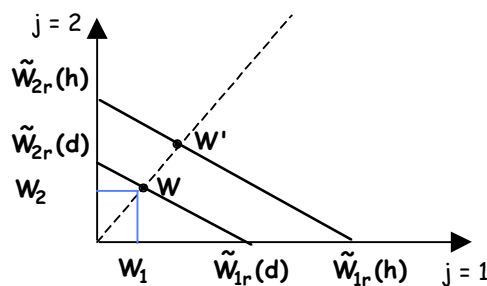


Figure 5.7 - Recherche du délai opératoire pour un travail  $W$  (ressources à charges couplées)

### 1.3 Caractérisation des ressources de transport

#### 1.3.1 Principes de modélisation

La logistique de distribution implique des opérations de transports d'objets : matières premières, produits semi-finis et produits finis. La réalisation effective d'un transport requiert l'utilisation d'une ou plusieurs ressources de transport.

Les ressources de transport possèdent des caractéristiques analogues à celles des ressources de transformation : renouvelables ou consommables, disjunctives ou cumulatives, à regroupement.

Néanmoins, pour ce qui nous concerne, il suffit de considérer :

- la **polyvalence** qui caractérise la variété des objets que la ressource est capable de transporter,
- la **capacité**, définie par le nombre d'objets transportables. Nous considérerons la *capacité cumulée sur la durée  $h$ , sans préjuger ni du nombre ni de la taille des lots individuels de transport.*

*Remarque : il est donc à noter que nous entendons par ressource de transport un ensemble de moyens capables de déplacer une quantité cumulée d'objets d'un lieu de transformation à un autre, dans un certain délai. C'est donc la capacité d'un "canal" de transport qui nous intéresse ici et non celles des mobiles (conteneurs) dont le nombre ne nous importe pas. En d'autres termes, nous considérons les ressources "virtuelles" de transport que traduisent les arcs du réseau représenté Figure 5.2, au même titre que les ressources "virtuelles" de transformation que constituent les nœuds de ce réseau.*

Nous définissons, dans un même temps, la notion de charge homogène (respectivement hétérogène) d'une ressource de transport comme la quantité d'objets homogènes (respectivement hétérogènes) qui lui est affectée (réellement ou hypothétiquement) sur un intervalle de temps.

Par hypothèse, les transports sont non préemptibles. Sont supposés connus :

- les différentes localisations possibles des objets (centrales logistiques, magasins, ...),
- les liaisons entre ces différentes localisations (voies empruntées, durées de transport),
- les transporteurs possibles (compétence, capacité, disponibilité)

1.3.2 Caractérisation d'une ressource virtuelle de transport

L'activité des ressources de transport s'applique aux *objets* comme les ressources de transformation s'appliquent aux *travaux*. Pour caractériser une capacité de transport, nous retenons deux classes : ressources de transport d'objets indépendants et ressources de transport d'objets couplés.

Dans ce qui suit, nous désignons par :

- $\hat{\Omega}_{irr'}(h)$  la charge de transport i-homogène, de la ressource  $r' \rightarrow r$  sur la durée  $h$ , c'est-à-dire la quantité totale d'objets de type  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) transportée durant la période  $h$  du lieu de transformation  $r'$  au lieu de transformation  $r$ ,
- $\tilde{\Omega}_{irr'}(h)$  la capacité de transport i-homogène, de la ressource  $r' \rightarrow r$  sur la durée  $h$ , c'est-à-dire la quantité totale d'objets de type  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) transportable durant la période  $h$  du lieu de transformation  $r'$  au lieu de transformation  $r$ .

**Ressource de transport à charges indépendantes**

Une ressource de transport à charges indépendantes est capable sur la durée  $h$  de cumuler les transports homogènes. Une activité de transport hétérogène réalisée par la ressource  $r' \rightarrow r$  est donc de la forme :

$$\hat{\Omega}_{rr'}(h) = [\hat{\Omega}_{1rr'}(h) \dots \hat{\Omega}_{irr'}(h) \dots \hat{\Omega}_{mrr'}(h)]$$

sans contrainte mutuelle, ce qui suppose que les transports ne partagent aucun moyen commun : équipement, temps, etc.

- L'activité d'une telle ressource est illustrée par la figure 5.8a.
- L'exploitabilité d'une ressource de transport à charges indépendantes est caractérisée par la Figure 5.8b.

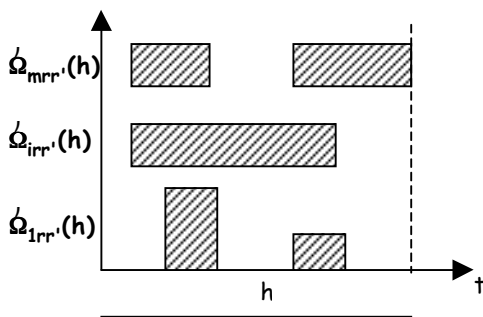


Figure 5.8a - Activité d'une ressource de transport à charges indépendantes

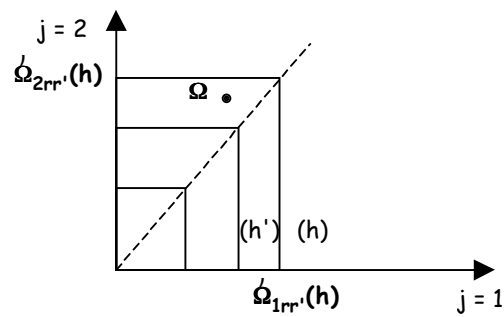


Figure 5.8b - Hyperplan de charge d'une ressource de transport à charges indépendantes

La charge hétérogène  $\Omega$  peut être allouée à la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  sur la durée  $h$  dès lors que:

$$\Omega_i(h) \leq \tilde{\Omega}_{irr'}(h) \quad \forall i = 1, \dots, m$$

plus simplement noté :

$$\Omega(h) \leq \tilde{\Omega}_{rr'}(h) \quad \text{avec} \quad \tilde{\Omega}_{rr'}(h) = [\tilde{\Omega}_{1rr'}(h) \dots \tilde{\Omega}_{mrr'}(h)] \quad (5.6)$$

**Ressources de transport à charges couplées**

Lorsque les transports mis en œuvre par une ressource partagent des moyens communs, les transports homogènes ne sont plus indépendants et il faut fournir un modèle de mixage. Par dualité avec les ressources de transformation, nous proposons pour les ressources de transport un modèle de mixage linéaire.

Par un raisonnement similaire, nous dirons que la charge hétérogène  $\Omega$  peut être allouée à la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  sur la durée  $h$  dès lors que :

$$\Omega^T(h) \tilde{\Omega}_{rr'}^{-1}(h) \leq 1 \quad \text{avec} \quad \tilde{\Omega}_{rr'}^{-1}(h) = \left[ \frac{1}{\tilde{\Omega}_{1rr'}(h)} \quad \dots \quad \frac{1}{\tilde{\Omega}_{irr'}(h)} \quad \dots \quad \frac{1}{\tilde{\Omega}_{mrr'}(h)} \right]^T \quad (5.7)$$

En définitive, une charge de transport  $\Omega$  peut être allouée à la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  sur la durée  $h$  dès lors que :

- $\Omega \leq \tilde{\Omega}_{rr'}(h)$  s'il s'agit d'une ressource à charges indépendantes
  - $\Omega^T \tilde{\Omega}_{rr'}^{-1}(h) \leq 1$  s'il s'agit d'une ressource à charges couplées
- (5.8)

*Remarque : il est à noter, comme dans le cas des ressources de transformation, que le modèle à charges couplées est exact dans le cas d'une ressource de transport disjonctive, approché dans le cas d'une ressource de transport cumulative.*

### 1.3.3 Délai de transport

Les capacités des ressources de transport ont été définies dans ce qui précède en tant que quantités de produits transportables dans un temps donné. A cette caractérisation *synchrone* correspond une approche *asynchrone* traduisant le délai  $d_{rr'}(\Omega)$  nécessaire à la réalisation par la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  de la quantité de produits hétérogènes  $\Omega$ . Par dualité avec les ressources de transformation, on obtient pour les ressources de transport les résultats suivants :

#### Ressource de transport à charges indépendantes

Le délai  $d_{rr'}(\Omega)$  nécessaire à la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  pour réaliser le transport hétérogène  $\Omega$  vérifie :

$$d_{rr'}(\Omega) = h \max_i \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_{irr'}(h)}, \quad d_{rr'}(\Omega) \leq h \quad (5.9)$$

#### Ressources de transformation à charges couplées

Ici encore, il faut rechercher l'horizon  $d_{rr'}(\Omega)$  tel que la capacité hétérogène de la ressource de transport sur cet horizon soit suffisante pour absorber le travail  $\Omega$ . On obtient alors :

$$d_{rr'}(\Omega) = h \Omega^T \tilde{\Omega}_{rr'}^{-1}(h) \quad d_{rr'}(\Omega) \leq h \quad (5.10)$$

Les données statiques et dynamiques concernant les transporteurs étant déterminées, l'objectif est de vérifier la faisabilité des transports induits par le scénario de production. Soit, compte tenu des contraintes de capacité et de disponibilité des transporteurs, que les produits nécessaires à la production seront livrés en temps et en quantité voulus.

## 2 ALLOCATION COHERENTE DE CHARGE

Le paragraphe précédent a présenté une caractérisation des capacités des ressources virtuelles de transformation et des ressources virtuelles de transport reliant les sites de transformation.

Il s'agit maintenant de considérer le réseau productif vu par un centre de conduite donné et résultant de l'interconnexion de ces deux types de ressources. Nous introduisons d'abord les tableaux de bord devant être offerts aux centres de conduite pour suivre l'état du réseau. Puis, sans prendre parti sur les mécanismes mêmes de décision, nous établissons un jeu de règles assurant la cohérence de tout scénario admissible d'allocation.

## 2.1 Les tableaux de bord

D'une manière générale, un tableau de bord est un ensemble d'indicateurs et d'informations représentatifs de l'état d'une ressource pilotée (groupe, service, département, unité, direction, division). Il apporte au décideur (responsable ou groupe de pilotage) la vision d'ensemble qui lui permet de déceler d'éventuelles dérives par rapport aux objectifs et de prendre des décisions correctives afin d'y remédier.

On distingue communément deux types de tableaux de bord [Gallois, 1995] :

- Le **tableau de bord de pilotage**, qui présente des indicateurs permettant la prise de décision et facilitant la poursuite des objectifs. Il comporte des variables de suivi représentatives de l'état passé et courant du système piloté, ainsi que des variables d'actions qui, instanciées par les décisions, permettent d'agir sur le futur du système. La fréquence de mise à jour de ce tableau de bord prend en compte la péremption des valeurs présentées et ne peut être inférieure à celle du tableau de bord de résultat.
- Le **tableau de bord de résultat** plus synthétique et déduit du précédent, est destiné à rendre compte des résultats de l'activité d'un gestionnaire à sa hiérarchie. Il peut être constitué d'extraits agrégés du tableau de bord de pilotage, donnant de façon synthétique la situation par rapport aux objectifs. La fréquence de mise à jour de ce tableau dépend de la périodicité de reporting demandée par le niveau supérieur.

Nous reprenons à notre compte ces notions en les appliquant au cas de tableaux de bord pour l'allocation de travaux dans un système distribué de production. Nous supposons que chaque centre de conduite ayant en charge l'allocation de transformations à des ressources internes et/ou externes dispose d'un tableau de bord de pilotage contenant des indicateurs de disponibilité de ces ressources. La connaissance de ces informations permet au centre de conduite de vérifier la cohérence du scénario de charge proposé par un algorithme ou par un décideur humain. Comme nous l'avons précisé en introduction, nous ne prendrons pas parti sur le choix de cet algorithme, la littérature scientifique en recherche opérationnelle rassemblant de nombreuses études algorithmiques consacrées à la résolution de problèmes d'affectation. Une fois la charge de travail allouée, la disponibilité des ressources est remise à jour pour réactualiser le tableau de bord.

Chaque centre de conduite dispose également d'un tableau de bord de suivi contenant des informations relatives à l'état réel de la production, lui permettant de mettre à jour ses décisions, et d'en prendre de nouvelles.

L'élaboration de ces tableaux de bord ne fait pas l'objet de nos travaux de recherche. Nous supposerons les disponibilités dynamiques des ressources connues.

## 2.2 Table d'allocation

Dans le cas général il est nécessaire de se donner des scénarios de répartition des charges, dans l'espace (sur les ressources) et dans le temps (sur les différentes périodes de l'horizon de planification), et ensuite d'en confronter la faisabilité au regard des capacités des ressources. La prise en compte du temps nous conduit à affiner nos notations.

L'horizon  $H$  est divisé en  $K$  périodes de durée constante  $h$ . Le réseau comporte  $R$  ressources de transformation.

$\{\hat{W}_r(k)\} \quad \forall r = 1, \dots, R, k = 1, \dots, K$  définit l'allocation des travaux, distribués dans le temps et dans l'espace,

$\{\tilde{W}_r(k)\} \quad \forall r = 1, \dots, R, k = 1, \dots, K$  est la matrice des capacités dynamiques des ressources (charge de transformation disponible),

$\{\hat{Q}_{r'r'}(k)\} \quad \forall r', r = 1, \dots, R, (r' \neq r), k = 1, \dots, K$  définit l'allocation des transports, distribués dans le temps et dans l'espace,

$\{\tilde{Q}_{r'r'}(k)\} \quad \forall r', r = 1, \dots, R, (r' \neq r), k = 1, \dots, K$  est la matrice des capacités logistiques (charges de transport disponibles) du réseau.

Un scénario d'allocation conjointe des travaux et des transports donne lieu à l'établissement d'une table d'allocation (Tableau 5.1) spécifiant le placement des travaux dans l'espace (distribution) et dans le temps (période) ainsi que les transports induits.

	k - 1	k	k + 1
$r$	$S_r(k)$		$S'_r(k)$
		$W_r(k)$	$W_r(k+1)$
		$\Omega_{rr'}(k)$	
$r'$	$W_{r'}(k-1)$	$S_{r'}(k)$	$S'_{r'}(k)$

h

Tableau 5.1 - Tableau d'allocation de charge

### 2.3 Equation généralisée des stocks

L'allocation du travail  $W_r(k)$  doit être compatible, sur le lieu de la ressource  $r$ , avec le stock général  $S_r(k)$  requis au début de la période  $k$ . Pour ce faire, compte tenu des contraintes de capacité des ressources de transport et des ressources de production, il faut suivre l'évolution dans le temps des stocks et exprimer les contraintes d'approvisionnement et d'expédition.

Les transports permettent d'acheminer des objets d'un site de transformation à un autre au gré des approvisionnements et des expéditions. Ainsi le stock au début d'une période résulte du stock au début de la période précédente auquel s'ajoutent les objets fabriqués et acheminés et se retranchent les produits consommés et expédiés durant la période écoulée.

- Soient
- $App_{r'r}(k)$  la quantité d'objets livrés à la ressource  $r$  en provenance de la ressource  $r'$  durant la période  $k$ ,
  - $Exp_{r'r}(k)$  la quantité d'objets expédiés par la ressource  $r$  à destination de la ressource  $r'$  durant la période  $k$ ,
  - $S_r(k)$  le stock général de la ressource  $r$  au début de la période  $k$ ,
  - $S'_r(k)$  le stock général de la ressource  $r$  à la fin de la période  $k$ ,
  - $C_r$  la matrice caractéristique du processus généralisé de la ressource  $r$

L'équation (4.2) peut être réécrite en intégrant les transports de la façon suivante :

$$\Delta S_r(k) = S'_r(k) - S_r(k) = S_r(k+1) - S_r(k) = C_r W_r(k) + \sum_{r'=1}^{r'=R} App_{r'r}(k) - \sum_{r'=1}^{r'=R} Exp_{r'r}(k) \tag{5.11}$$

$\forall r = 1, \dots, R, k = 1, \dots, K$  avec  $S_r(1)$  donné.

Remarque : la distribution initiale ( $k = 1$ ) et finale ( $k = K$ ) des stocks dans le réseau doivent coïncider avec le stock virtuel précédant et résultant de la transformation  $W(H)$  (équation 4.1)

- $S = [S_1(1) \dots S_r(1) \dots S_R(1)]$ ,
- $S' = [S'_1(K) \dots S'_r(K) \dots S'_R(K)]$

avec  $S - S' = C W(H)$

Cette équation générique est valable quels que soient les objets concernés (matières premières, produits semi-finis et finis). En effet une entreprise peut aussi expédier des matières premières ou des produits semi-finis.

## 2.4 Règles de cohérence

Quels que soient les critères d'allocation utilisés, chaque scénario d'allocation, pour être admissible, devra vérifier un certain nombre de règles de cohérence. En effet, l'allocation de charge est soumise, dans sa distribution temporelle, aux contraintes d'antériorité propres aux processus de fabrication, et, dans sa distribution spatiale, au respect des capacités des ressources de transformation et de transport [Lecompte, 2000].

### 2.4.1 Synchronisation logistique/production

#### Conservation du flux de matière

La quantité d'objets livrés à  $r$  durant la période  $k$  par chaque fournisseurs  $r'$  ( $r' \neq r$ ) doit être égale à la quantité d'objets expédiés par ce fournisseur durant la même période. Soit :

$$\sum_{r''} \text{App}_{r,r''}(k) = \sum_{r''} \text{Exp}_{r,r''}(k) \quad \forall r, r' = 1, \dots, R \ (r' \neq r), \forall k = 1, \dots, K \quad (5.12)$$

### 2.4.2 Contraintes sur les stocks

Le séquençement sur une période des activités logistique et de production est représenté par le tableau 5.2. Sur chaque période  $k$ , il faut s'assurer que les variations de stocks induites par les transports et les fabrications ne violent pas les contraintes de stock plancher et de stock plafond.

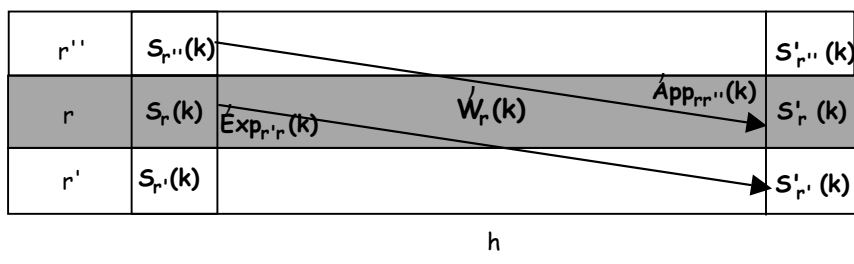


Tableau 5.2 - Séquençement sur une période des opérations d'approvisionnement, de transformation et d'expédition

#### Contrainte de stock minimal en début de période

En début de période  $k$ , la quantité d'objets de toute nature présente en stock doit être suffisante par rapport aux contraintes de stock de sécurité pour permettre la fabrication  $W_r(k)$  et les expéditions de la ressource  $r$ .

$$\underline{S}_r \leq S_r(k) - \sum_{r''=1}^{r''=R} \text{Exp}_{r,r''}(k) + C_r W_r(k) \quad \forall r = 1, \dots, R \ (r' \neq r), \forall k = 1, \dots, K \quad (5.13)$$

#### Contrainte de stock maximal en fin de période

En fin de période  $k$ , la quantité d'objets de toute nature, en stocks, approvisionnés, expédiés, et fabriqués par la ressource  $r$  sur cette période, doit être inférieure à la capacité maximale de stockage (stock plafond).

$$S_r(k) - \sum_{r''=1}^{r''=R} \text{Exp}_{r,r''}(k) + C_r W_r(k) + \sum_{r''=1}^{r''=R} \text{App}_{r,r''}(k) \leq \bar{S}_r \quad \forall r = 1, \dots, R, \ (r'' \neq r' \neq r), \forall k = 1, \dots, K \quad (5.14)$$

### 2.4.3 Couverture des travaux

La distribution des travaux  $\{W_r(k)\}$  doit réaliser le plan global  $W(H)$ . La somme des travaux  $W_r(k)$  alloués aux  $R$  ressources sur les  $k$  périodes doit donc être égale au travail initialement demandé  $W(H)$  sur l'horizon



H. Soit :

$$W(H) = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K W_r(k) \quad (5.15)$$

#### 2.4.4 Contraintes de précédence entre travaux

L'ensemble des processus de transformation réalisables par la ressource  $r$  est modélisé par la matrice  $C$ . Le déploiement des travaux dans le temps doit respecter les contraintes d'antériorité exprimées par la matrice  $C$  (Figure 5.9).



Figure 5.9 - Contraintes de précédence entre travaux

Soient :

$\hat{W}(k) = [\hat{W}_1(k) \quad \hat{W}_r(k) \quad \hat{W}_R(k)]$  la concaténation des travaux durant la période  $k$  sur toutes les ressources,

$S(k) = [S_1(k) \quad S_r(k) \quad S_R(k)]$  et  $S'(k) = [S'_1(k) \quad S'_r(k) \quad S'_R(k)]$  les niveaux de stock initiaux et finaux, globaux, relatifs à la période  $k$ . Ces stocks caractérisent l'état du stock virtuel (i.e. spatialement distribué sur les ressources)

$$S(k) = \sum_{r=1}^R S_r(k), \quad S'(k) = \sum_{r=1}^R S'_r(k)$$

La progression du processus de production se traduit par :

$$S'(k) = S(k) + C\hat{W}(k) = S'(k-1) + C\hat{W}(k)$$

$$S'(k) = S(k-1) + C\hat{W}(k-1) + C\hat{W}(k)$$

$$S'(k) = S(k-1) + C[\hat{W}(k-1) + \hat{W}(k)]$$

$$S'(k) = \text{etc.} \dots$$

La trajectoire du processus, initialisée par  $S(1)$  doit aboutir à  $S'(K)$  fixé. D'où la condition à vérifier sur chaque période :

$$\sum_{k=1}^K C\hat{W}(k) = S'(K) - S(1) \quad (5.16)$$

avec  $S(1)$  niveau de stock virtuel initial.

*Remarque : la vérification de la conformité de l'allocation de charge par l'équation (5.16) permet d'assurer le respect des contraintes de précédence. Néanmoins, cette règle est approchée car les contraintes de précédence portent sur des paquets de travail et non sur les transformations unitaires du processus de production généralisée. Cependant, plus la période  $h$  diminue, plus cette règle tend à être exacte, le prix à payer étant une augmentation du nombre de données à prendre en compte.*

En effet, la complexité du modèle de données est la suivante :

$$\begin{aligned} \tau &= nRK = nRH/h && \text{(données charge)} \\ \sigma &= mRH/h && \text{(données stock)} \end{aligned}$$

#### 2.4.5 Respect des capacités des ressources

##### Ressources de transformation

La charge  $\hat{W}_r(k)$  doit respecter la capacité hétérogène de la ressource  $r$  sur la période  $k$ , soit, en vertu de la condition (5.3) :

- Ressources de transformation à charges indépendantes (5.17)

$$\hat{W}_r(k) \leq \tilde{W}_r(k) \quad \forall r = 1, \dots, R, k = 1, \dots, K$$

- Ressources de transformation à charges couplées

$$\hat{W}_r^T(k) \tilde{W}_r^{-1}(k) \leq 1 \quad \forall r = 1, \dots, R, k = 1, \dots, K$$

##### Ressources de transport

De la même façon, la charge  $\hat{A}_{rr'}(k)$  doit respecter la capacité hétérogène de la ressource de transport  $r' \rightarrow r$  sur la période  $k$ , soit, en vertu de la condition (5.8) :

- Ressources de transport à charges indépendantes (5.18)

$$\hat{A}_{rr'}(k) \leq \tilde{Q}_{rr'}(k) \quad \forall r, r' = 1, \dots, R \ (r' \neq r), \forall k = 1, \dots, K$$

- Ressources de transport à charges couplées

$$\hat{A}_{rr'}(k)^T \tilde{Q}_{rr'}^{-1}(k) \leq 1 \quad \forall r, r' = 1, \dots, R \ (r' \neq r), \forall k = 1, \dots, K$$

### 3 CONCLUSION

Ce chapitre établit un ensemble de règles de cohérence permettant d'attester de la faisabilité opérationnelle du scénario d'allocation choisi par un centre de conduite et issu soit d'un algorithme, soit d'une décision humaine.

Dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur une caractérisation générique des ressources de transformation. Celles-ci pouvant être à charges dépendantes (cas des ressources disjonctives et de certaines ressources cumulatives) ou à charges indépendantes (cas de certaines ressources cumulatives), deux modèles de capacité ont été présentés.

Toute production impliquant des transferts de flux de produits entre ressources de transformation, les ressources de transport ont été modélisées dans un second temps. Deux modèles de capacité analogues à ceux des ressources de transformation ont été établis. La modélisation conjointe des ressources a permis de combiner l'équation de production généralisée développée au chapitre précédent avec la logistique d'approvisionnement. Finalement, compte tenu des caractéristiques des différentes ressources, des règles visant à garantir la cohérence des scénarios d'allocation ont été présentées. Ces règles de cohérence concernent :

- la conservation du flux de matière,
- le séquençement production/transport,
- la couverture des travaux,
- la couverture des transports,
- la précedence entre transformations,
- la capacité des ressources de transformation,
- la capacité des ressources de transport.

Le modèle de production local d'un centre de conduite assorti des contraintes à respecter est résumé page suivante.

Au sein d'une architecture de conduite, chaque centre de conduite gestionnaire d'une ressource de transformation virtuelle doit interagir avec d'autres centres de même niveau hiérarchique et/ou de niveau hiérarchique adjacent. La dernière partie de ce mémoire s'attache à adapter le modèle de données à la complexité du système distribué de production, d'une part en formalisant l'intégration horizontale des modèles locaux, d'autre part en proposant les mécanismes d'agrégation requis par l'intégration verticale multi-niveau du modèle de données.

**MODELE LOCAL D'UN CENTRE DE DECISION**

Pour réaliser le travail  $W(H)$  au moyen d'un réseau de  $R$  ressources accessibles, il faut :

Définir une allocation de travaux et de transports  $\forall r, r' = 1, \dots, R$  ( $r' \neq r$ ) ,  $\forall k = 1, \dots, K$

$$\{ \overset{\frown}{W}_r(k) \}, \{ \overset{\frown}{A}_{pp_{r'r'}}(k) \}, \{ \overset{\frown}{E}_{xp_{r'r'}}(k) \}$$

avec  $S = [S_1(1) \dots S_r(1) \dots S_R(1)]$  ,  $S' = [S'_1(K) \dots S'_r(K) \dots S'_R(K)]$  donnés

conduisant aux variations locales

$$\Delta S_r(k) = S'_r(k) - S_r(k) = S_r(k+1) - S_r(k) = C_r \overset{\frown}{W}_r(k) + \sum_{r'=1}^{r'-R} \overset{\frown}{A}_{pp_{r'r'}}(k) - \sum_{r'=1}^{r'-R} \overset{\frown}{E}_{xp_{r'r'}}(k) \quad (5.11)$$

Sous les contraintes :

Logiques, physiques et de gestion :

$$S_r, S'_r \in \mathbb{N}^m \quad \overset{\frown}{W}_r \in \mathbb{N}^n$$

$$\Delta S_{ra} = S'_{ra} - S_{ra} \in \mathbb{Z}^- , \Delta S_{rb} \in \mathbb{Z} , \Delta S_{rc} = S'_{rc} - S_{rc} \in \mathbb{Z}^+$$

$$0 \leq \underline{S}_{ri} \leq S_{ri} \leq \overline{S}_{ri}$$

Des opérateurs de production :

Couverture des travaux

$$W(H) = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \overset{\frown}{W}_r(k) \quad \forall r = 1, \dots, R , \forall k = 1, \dots, K \quad (5.15)$$

Contraintes de précédence entre tâches

$$\sum_{k=1}^K C \overset{\frown}{W}(k) = S'(K) - S(1) \quad (5.16)$$

Capacité des opérateurs

$$\begin{aligned} \overset{\frown}{W}_r(k) &\leq \tilde{W}_r(k) && \text{Ressources de transformation à charges indépendantes} \\ \overset{\frown}{W}_r^T(k) \tilde{W}_r^{-1}(k) &\leq 1 && \text{Ressources de transformation à charges couplées} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Des ressources de transport :

Conservation du flux de matière

$$\overset{\frown}{A}_{pp_{r'r'}}(k) = \overset{\frown}{E}_{xp_{r'r'}}(k) \quad \forall r, r' = 1, \dots, R$$
 ( $r' \neq r$ ) ,  $\forall k = 1, \dots, K$  (5.12)

Cumul des transporteurs

$$\begin{aligned} \overset{\frown}{A}_{pp_{r'r'}}(k) &\leq \tilde{Q}_{r'r'}(k) && \text{Ressources de transport à charges indépendantes} \\ \overset{\frown}{A}_{pp_{r'r'}}^T(k) \tilde{Q}_{r'r'}^{-1}(k) &\leq 1 && \text{Ressources de transport à charges couplées} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Des stocks

Contrainte de stock minimal en début de période

$$S_r \leq S_r(k) - \sum_{r'=1}^{r'-R} \overset{\frown}{E}_{xp_{r'r'}}(k) + C_r \overset{\frown}{W}_r(k) \quad \forall r = 1, \dots, R$$
 ( $r' \neq r$ ) ,  $\forall k = 1, \dots, K$  (5.13)

Contrainte de stock maximal en fin de période

$$S_r(k) - \sum_{r'=1}^{r'-R} \overset{\frown}{E}_{xp_{r'r'}}(k) + C_r \overset{\frown}{W}_r(k) + \sum_{r''=1}^{r''=R} \overset{\frown}{A}_{pp_{r'r''}}(k) \leq \overline{S}_r \quad \forall r = 1, \dots, R$$
 , ( $r'' \neq r' \neq r$ ) ,  $\forall k = 1, \dots, K$  (5.14)

## Chapitre 6

### Récursivité du modèle de données

Nous avons développé au chapitre 5 un modèle de données et un cadre de décision, au travers de règles de cohérence, pour la conduite des activités de production placées sous la responsabilité d'un centre de conduite générique. Ces propositions ont été élaborées en accord avec une approche généralisée de la gestion de production des organisations industrielles réticulaires.

Le système de conduite généralisée (chapitre 3, §3) combine une approche hiérarchisée en plusieurs niveaux de l'activité décisionnelle et une approche distribuée de cette même activité entre plusieurs centres de conduite d'un même niveau. Chaque centre dispose d'un modèle de données qui lui est propre<sup>39</sup>. La cohérence globale de l'activité décisionnelle est, de fait, tributaire des interactions entre les centres de pilotage contribuant à la réalisation du carnet de commandes.

La représentation générique des centres de conduite (chapitre 3, §2.4.2) inclut les interfaces liant chaque centre à ses semblables, l'ensemble des centres de conduite constituant une structure réticulaire ou "fractale" [Warnecke, 1993]. Dans ce chapitre, il s'agit donc d'explicitier les rapports de cohérence entre les modèles locaux de données. Compte tenu du contexte multi-niveau et distribué de la décision, la cohérence des modèles locaux de données doit être garantie au regard de deux dimensions (Figure 6.1) :

- une **cohérence horizontale** entre modèles de données de centres de conduite coopérants. Ce type de cohérence implique les liens horizontaux de coopération.
- une **cohérence verticale** entre le modèle de données d'un centre de conduite et les modèles de données de ses centres subordonnés. Ce type de cohérence implique les liens verticaux hiérarchiques mère /filles.

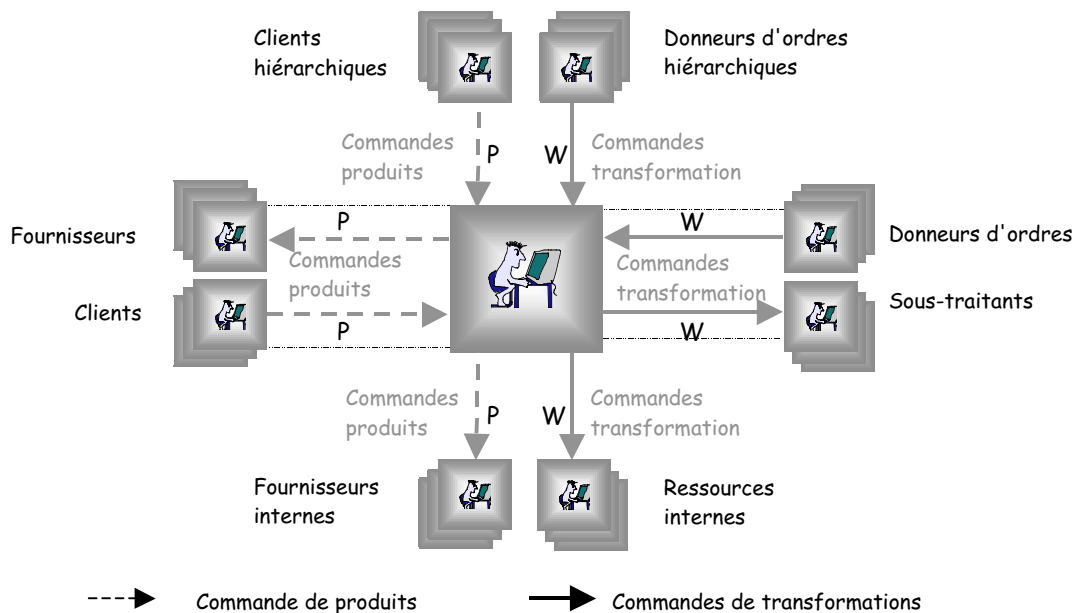


Figure 6.1 - Environnement d'un centre de conduite

<sup>39</sup> le modèle de données local caractérise le problème de décision vu par le centre considéré : plans nomenclatures, gammes et ressources.

Dans tout ce qui suit, il est entendu que chaque ressource virtuelle (décomposable) ou réelle (non décomposable) est systématiquement dotée d'un centre de conduite chargé d'en gérer l'activité, en relation avec son environnement. Nous ferons donc, dans ce chapitre, l'amalgame entre ressource et centre de conduite associé. Nous désignons par  $(r, v)$  la ressource/centre de conduite  $r$  de niveau  $v$ .

Le système de notation utilisé dans les chapitres précédents sera affiné au fur et à mesure des besoins.

Dans ce chapitre, nous manipulons plusieurs référentiels de données :

- traitant de l'intégration verticale des données, nous lierons les données d'un niveau  $v$  (données agrégées) et les données correspondantes au niveau  $v-1$  (données détaillées),
- traitant de l'intégration horizontale des données, nous identifierons le lien entre les données locales connues par les différents centres de conduite coopérant au sein d'un réseau de partenariat et les données globales relatives à l'ensemble du réseau.

L'intégration horizontale va nous permettre de vérifier la cohérence de la répartition des données entre les CC d'un réseau, tandis que l'intégration verticale vise à garantir la cohérence des données détaillées eu égard à leur image agrégée.

Le lecteur pourra se reporter au référentiel de notation présenté Figure 6.2. Les notations utilisées sont les suivantes :

**Vue externe agrégée de  $(r, v)$**

Soient  $O_r^v$ ,  $T_r^v$  et  $C_r^v$  les données statiques et  $S_r^v$ ,  $W_r^v$  les données dynamiques associées à la ressource  $(r, v)$  dans une représentation externe agrégée,

**Vue externe détaillée de  $(r, v)$**

Soient  $O_r^{v,v-1}$ ,  $T_r^{v,v-1}$  et  $C_r^{v,v-1}$  les données statiques et  $S_r^{v,v-1}$ ,  $W_r^{v,v-1}$  les données dynamiques associées à la ressource  $(r, v)$  dans une représentation externe détaillée,

*Remarque : nous verrons que le passage de la vue externe agrégée à la vue externe détaillée implique des données locales complémentaires définies par deux matrices  $M_r^{v,v-1}$  et  $N_r^{v,v-1}$ .*

**Vue interne détaillée de  $(r, v)$**

La vue interne de  $(r, v)$  fait apparaître un réseau impliquant un ensemble de ressources encapsulées  $\mathfrak{R}_r^{v,v-1} = \{r', v-1\}$  avec  $\text{card } \mathfrak{R} = R_r^v$ .

*Remarque : le passage de la vue externe détaillée à la vue interne détaillée de  $(r, v)$  est caractéristique du réseau encapsulé à  $(r, v)$  et de la répartition des données auprès des nœuds du réseau. Le lien entre les données externes et interne à  $(r, v)$  est défini par trois applications :*

Stock agrégé	$S_r^{v,v-1}$	$\longrightarrow$	$[S_1^{v-1}, \dots, S_{R_r^v}^{v-1}]$	répartition des stocks détaillés
Travail agrégé	$W_r^{v,v-1}$	$\longrightarrow$	$[W_1^{v-1}, \dots, W_{R_r^v}^{v-1}]$	répartition des travaux détaillés
Processus agrégé	$C_r^{v,v-1}$	$\longrightarrow$	$[C_1^{v-1}, \dots, C_{R_r^v}^{v-1}]$	répartition des processus détaillés

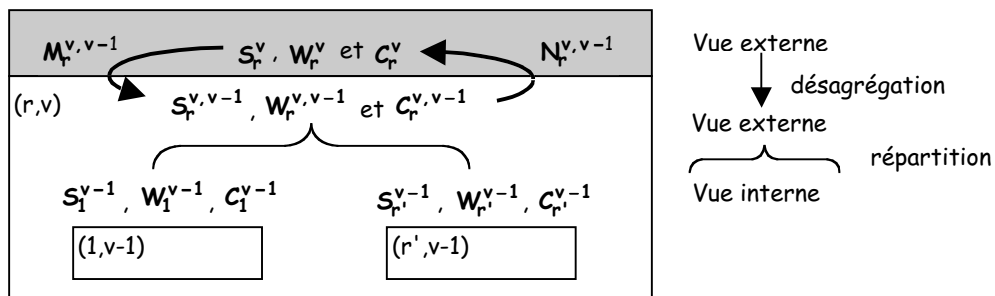


Figure 6.2 - Référentiel de notation

## 1 L'INTEGRATION VERTICALE DES MODELES DE DONNEES

### 1.1 Introduction

L'architecture de conduite généralisée sous-jacente à cette thèse est basée sur la décomposition récursive simultanée des ressources, des transformations et des objets impliqués dans un processus de production.

- une ressource virtuelle de niveau  $v$  est détaillée en un ensemble de ressources de niveau  $v-1$ .
- une transformation de niveau  $v$  est détaillée par un processus de niveau  $v-1$  rendant visibles de nouvelles transformations et de nouveaux objets. Inversement, l'agrégation d'un processus détaillé engendre une transformation simple -considérée comme telle- au niveau supérieur.
- un objet de niveau  $v$  est détaillé par une collection d'objets au niveau  $v-1$ , qui sont les matérialisations fines de l'objet virtuel vu au niveau  $v$ . Il peut s'agir du détail des fournitures nécessaires à la réalisation d'une fabrication, mais aussi du détail des produits sortants ou des objets intermédiaires.

Ce principe de décomposition est cohérent avec l'idée de base de notre modélisation : quel que soit le niveau de représentation considéré, les objets caractérisent en effet des états bien définis de la matière, tandis que transformations et processus représentent, à des niveaux de détail différents, les transitions entre les états remarquables définis par les objets.

#### 1.1.1 La désagrégation des ressources

L'architecture du système de conduite généralisé est basé sur une représentation des ressources en plusieurs niveaux. Dans la littérature, deux types de décomposition non exclusifs sont généralement rencontrés :

- la décomposition fonctionnelle de type NBS (entreprise, atelier, cellule, îlot, ... , ). Cette décomposition des ressources va de pair avec la désagrégation des produits,
- la décomposition des ressources par "caractéristiques secondaires" [Mercé, 1997], (atelier de peinture, cellule de fraisage, ... ) qui va de pair avec la désagrégation des tâches.

Ces deux approches sont compatibles avec les principes de désagrégation des ressources en organisations réticulaires, base de notre modélisation.

#### 1.1.2 La désagrégation des objets

Au plan matériel, un objet est constitué d'un ensemble ordonné d'objets moins complexes (composants), dont la constitution est décrite par la nomenclature<sup>40</sup>. D'autres critères de désagrégation peuvent être utilisés : dans un objectif de réduction des coûts par exemple, une politique consiste à regrouper un ensemble d'objets homogènes ou hétérogène en lots (Figure 6.3).

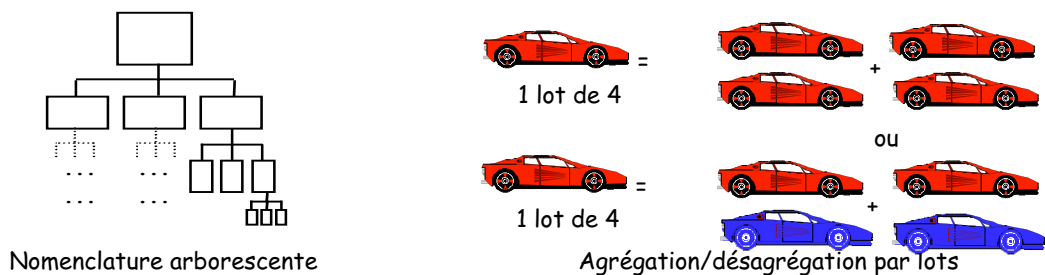


Figure 6.3 - Désagrégation des objets

#### 1.1.3 La désagrégation des transformations

Toute transformation, considérée comme telle, peut être représentée de manière plus détaillée par un processus décrivant des modalités opératoires plus précises. Le processus obtenu implique lui-même de nouvelles transformations décomposables à leur tour (Figure 6.4). Le rapport transformation/processus est donc au cœur de la désagrégation des données techniques.

<sup>40</sup> sens donné au terme "nomenclature" dans l'industrie

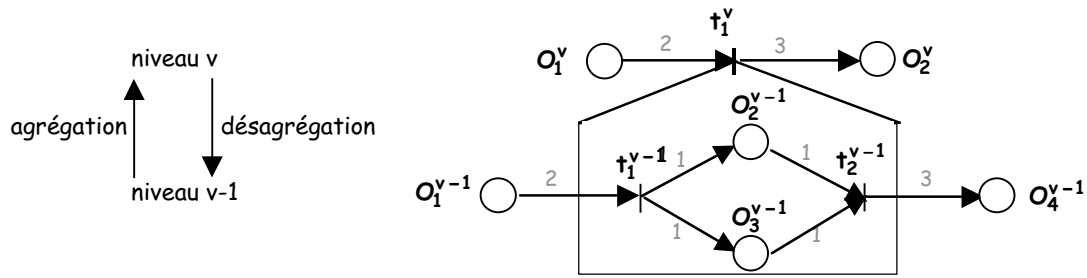


Figure 6.4 - Désagrégation des transformations

#### 1.1.4 La désagrégation du temps

La structuration en niveaux du système de conduite généralisé repose sur le postulat suivant : les horizons et périodes de deux niveaux successifs  $v$  et  $v-1$  sont liés par la relation suivante :

$$H^{v-1} = h^v \quad (6.1)$$

où  $H^{v-1}$  est l'horizon de niveau  $v-1$  et  $h^v$  la période de niveau  $v$ . Ce principe est notamment explicité dans les grilles GRAI.

#### 1.2 Modèle de désagrégation des processus

Le nombre gigantesque de composantes des nomenclatures objets et transformations relatives à un système complexe peut être réduit par l'utilisation des techniques d'agrégation/désagrégation associées aux structures décisionnelles multi-niveau. Afin d'éviter les dysfonctionnements liés à l'hétérogénéité des supports d'information/décision intra et inter-niveau, et pour garantir la cohérence et la robustesse des décisions, nous nous proposons, sur la base du modèle de données générique défini dans les chapitre 3, 4, 5, d'explicitier au travers d'un *formalisme unifié*, les liens entre modèles de données de niveaux de décisions successifs.

On considère la ressource  $(r, v)$  dont le modèle de production est :

$$\Delta S_r^v = C_r^v W_r^v \quad (6.2)$$

où, pour mémoire :

la variation de stock généralisé  $\Delta S_r^v$  se réfère à la nomenclature-objet  $O_r^v$

le travail  $W_r^v$  se réfère à la nomenclature-transformation  $T_r^v$

la matrice  $C_r^v$  définit le processus généralisé réalisable par la ressource  $(r, v)$

Le processus (agrégé) de niveau  $v$  peut être explicité au niveau  $v-1$  par un processus (désagrégé) plus détaillé, défini par une nomenclature  $O_r^{v,v-1}$  d'objets, une nomenclature  $T_r^{v,v-1}$  de transformations et une matrice caractéristique  $C_r^{v,v-1}$ .

Le but est ici de relier le modèle de production (6.2) de niveau  $v$  au modèle explicité au niveau  $v-1$ , lui-même de la forme :

$$\Delta S_r^{v,v-1} = C_r^{v,v-1} W_r^{v,v-1} \quad (6.3)$$

*Remarque : Il importe de noter que la désagrégation de données s'accompagne nécessairement de l'injection d'une information locale complémentaire, exprimant des modalités opératoires précises (Figure 6.5).*



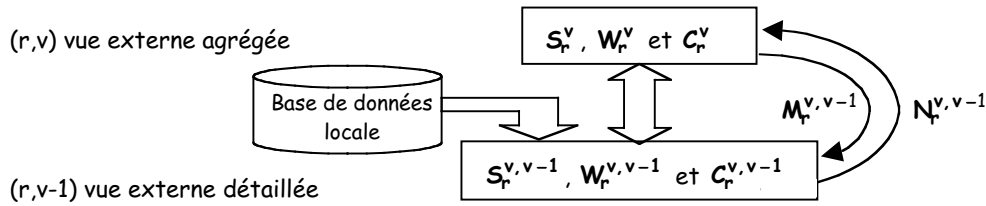


Figure 6.5 - Désagrégation de données

Dans un souci de généralité, nous considérons que la désagrégation d'un processus peut concerner à la fois les transformations et les objets. Un exemple de référence (Figure 6.6) permettra d'illustrer les résultats.

Il importe de noter que certains objets de niveau v-1 (ici  $O_1^{v-1}$ ,  $O_2^{v-1}$ ,  $O_3^{v-1}$ ,  $O_7^{v-1}$ ,  $O_8^{v-1}$ ,  $O_{11}^{v-1}$ ,  $O_{12}^{v-1}$ ,  $O_{13}^{v-1}$ ) sont issus de la désagrégation des objets de niveau v, tandis que les autres (ici  $O_4^{v-1}$ ,  $O_5^{v-1}$ ,  $O_6^{v-1}$ ,  $O_9^{v-1}$ ,  $O_{10}^{v-1}$ ) n'apparaissent que comme états intermédiaires résultant de la désagrégation des transformations en processus. La nomenclature des objets de niveau v-1 peut donc être partitionnée comme suit :

$$O_r^{v,v-1} = \overline{O}_r^{v,v-1} \cup \underline{O}_r^{v,v-1} \quad (6.4)$$

avec  $\overline{O}_r^{v,v-1}$  nomenclature des objets de niveau v-1 dérivée de la nomenclature des objets de niveau v,  $\underline{O}_r^{v,v-1}$  nomenclature des objets de niveau v-1 introduits par désagrégation des transformations de niveau v.

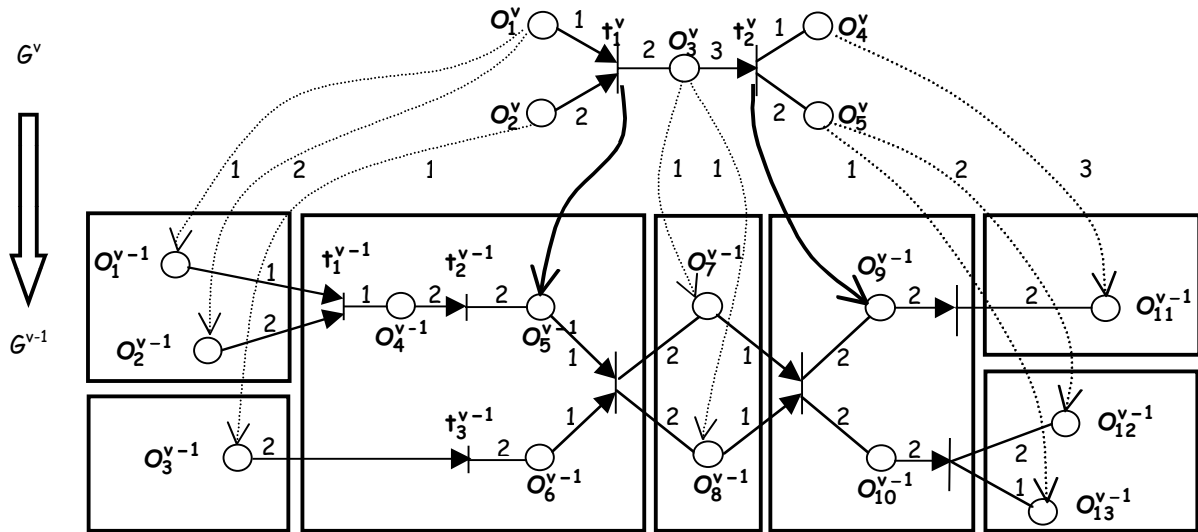


Figure 6.6 - Exemple de désagrégation de processus

### 1.2.1 Désagrégation des objets

Chaque objet du niveau v représente une collection d'objets de niveau v-1. Dans l'exemple de référence, l'objet  $O_1^v$  est décliné au niveau v-1 par des objets de type  $O_1^{v-1}$  et  $O_2^{v-1}$ . Une quantité d'objets de type  $O_1^v$  recouvre donc une quantité proportionnelle d'objets de type  $O_1^{v-1}$  et une quantité proportionnelle d'objets de type  $O_2^{v-1}$ . Ce lien de proportionnalité entre les objets de la nomenclature  $\overline{O}_r^{v,v-1}$  et les objets de la nomenclature  $O_r^v$  est traduit par la relation linéaire :

$$\overline{\Delta S}_r^{v,v-1} = M_r^{v,v-1} \Delta S_r^v \quad (6.5)$$

avec  $M_r^{v,v-1}$  matrice de désagrégation des nomenclatures-objets et  $\overline{\Delta S}_r^{v,v-1}$  vecteur stock des objets

appartenant à la nomenclature  $\overline{O}_r^{v,v-1}$ .

Dans l'exemple de référence, la désagrégation des objets a été définie comme suit :

- un objet de type  $O_1^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_1^{v-1}$  et 2 objets de type  $O_2^{v-1}$
- un objet de type  $O_2^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_3^{v-1}$
- un objet de type  $O_3^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_7^{v-1}$  et 1 objet de type  $O_8^{v-1}$
- un objet de type  $O_4^v$  se désagrège en 3 objets de type  $O_{11}^{v-1}$
- un objet de type  $O_5^v$  se désagrège en 2 objets de type  $O_{12}^{v-1}$  et 1 objet de type  $O_{13}^{v-1}$

$$\text{d'où } M_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ainsi l'objet  $O_1^v$  est-il perçu au niveau  $v$  comme une entité et, au niveau  $v-1$ , comme une collection constituée de 3 objets (un  $O_1^{v-1}$  et deux  $O_2^{v-1}$ ). Par contre, l'objet  $O_2^v$  est vu comme un seul objet (de type  $O_3^{v-1}$ ) au niveau inférieur. Dans ce dernier cas, il ne s'agit donc pas à proprement parler de désagrégation, mais l'objet est visible aux deux niveaux de nomenclature.

### 1.2.2 Désagrégation des travaux

Toute transformation de niveau  $v$  est désagrégée en un processus de niveau  $v-1$ , engendrant de nouvelles transformations.

Les travaux désagrégés sont proportionnels aux travaux agrégés dont ils dérivent, ce qu'exprime la relation :

$$W_r^{v,v-1} = N_r^{v,v-1} W_r^v \quad (6.6)$$

avec  $N_r^{v,v-1}$  matrice de désagrégation des travaux

Néanmoins, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, il y a un lien entre la désagrégation des objets, la désagrégation des transformations et les processus. La matrice  $N_r^{v,v-1}$  doit en effet être telle que la consommation/production des objets de niveau  $v-1$  soit en accord avec la consommation/production des objets de niveau  $v$ .

### 1.2.3 Cohérence inter-niveau

La désagrégation du processus est caractérisée par les matrices  $M_r^{v,v-1}$  et  $N_r^{v,v-1}$  qui engendrent les objets et les transformations du niveau  $v-1$  à partir de ceux du niveau  $v$ . Mais les objets et les transformations de niveau  $v-1$  sont par ailleurs liés entre eux par le processus défini par la matrice  $C_r^{v,v-1}$ . Il faut donc que l'équation de production observée au niveau  $v$  soit cohérente avec l'équation de production observée au niveau  $v-1$ , ce qui suppose le respect d'une relation liant les matrices  $C_r^v$ ,  $C_r^{v,v-1}$ ,  $M_r^{v,v-1}$ ,  $N_r^{v,v-1}$ , que nous allons maintenant établir.

Comme indiqué par la relation (6.4), les objets désagrégés constituent la nomenclature  $\overline{O}_r^{v,v-1}$  qui n'est qu'une partie de la nomenclature  $O_r^{v-1}$  des objets de niveau  $v-1$ . On peut donc écrire :

$$\overline{\Delta S}_r^{v,v-1} = I_r^{v,v-1} \Delta S_r^{v,v-1} \quad (6.7)$$

avec  $I_r^{v,v-1}$  matrice à éléments binaires de dimensions ( $\text{card } \overline{O}_r^{v,v-1} \times \text{card } O_r^{v,v-1}$ ) pointant les objets

désagrégés au sein de la nomenclature  $O_r^{v,v-1}$ .

Dans notre exemple,  $\overline{O}_r^{v,v-1} = \{O_1^{v-1}, O_2^{v-1}, O_3^{v-1}, O_7^{v-1}, O_8^{v-1}, O_{11}^{v-1}, O_{12}^{v-1}, O_{13}^{v-1}\}$

$$\text{d'où : } \mathbf{I}_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La combinaison des relations (6.2) et (6.7) donne :

$$\overline{\Delta S}_r^{v,v-1} = \mathbf{I}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^{v,v-1} \mathbf{W}_r^{v,v-1} \tag{6.8}$$

ou encore, d'après (6.5) et (6.6):

$$\mathbf{M}_r^{v,v-1} \Delta S_r^v = \mathbf{I}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^{v,v-1} \mathbf{N}_r^{v,v-1} \mathbf{W}_r^v$$

Cette dernière expression, compte tenu de (6.1) s'écrit enfin :

$$\mathbf{M}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^v \mathbf{W}_r^v = \mathbf{I}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^{v,v-1} \mathbf{N}_r^{v,v-1} \mathbf{W}_r^v$$

La relation recherchée est donc :

$$\mathbf{M}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^v = \mathbf{I}_r^{v,v-1} \mathbf{C}_r^{v,v-1} \mathbf{N}_r^{v,v-1} \tag{6.9}$$

La relation (6.9) garantit la cohérence de la désagrégation définie par  $\mathbf{M}_r^{v,v-1}$  et  $\mathbf{N}_r^{v,v-1}$ . Il lui correspond le schéma présenté Figure 6.7.

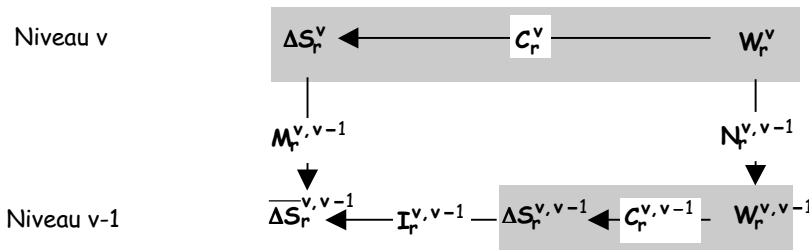


Figure 6.7 - Désagrégation cohérente de processus

La relation (6.9) peut être utilisée de diverses manières : vérifier la cohérence des représentations d'un même processus décrit à deux niveaux contigus, déterminer les agrégateurs liant deux niveaux de représentation, ou encore déterminer une matrice caractéristique du processus à partir de son image à un autre niveau et des agrégateurs.

A titre d'illustration, nous appliquons cette relation à la détermination de la matrice de désagrégation  $\mathbf{N}_r^{v,v-1}$  connaissant les données :  $\mathbf{C}_r^v$ ,  $\mathbf{C}_r^{v,v-1}$  et  $\mathbf{M}_r^{v,v-1}$  (cf. exemple de référence).

$$\mathbf{C}_r^v = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ 2 & -3 \\ 0 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C}_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad I_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le membre de gauche de la relation (6.8) donne :

$$M_r^{v,v-1} C_r^v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ 2 & -3 \\ 0 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ -2 & 0 \\ 2 & -3 \\ 2 & -3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 4 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Le membre de droite donne :

$$I_r^{v,v-1} C_r^{v,v-1} N_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} N_r^{v,v-1}$$

La matrice de décomposition des travaux  $N_r^{v,v-1}$  doit donc vérifier :

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} N_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ -2 & 0 \\ 2 & -3 \\ 2 & -3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 4 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Toute matrice  $N_r^{v,v-1}$  vérifiant la relation (6.10) rend la désagrégation cohérente.

Par exemple,  $N_r^{v,v-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ * & * \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3/2 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$  est une solution qui rend la désagrégation cohérente.

*Remarques :* Les termes notés \* sont indifférents car la transformation  $t_2^{v-1}$  n'influe que sur les objets  $O_4^{v-1}$  et  $O_5^{v-1}$  qui n'appartiennent pas à la nomenclature  $\overline{O}_r^{v,v-1}$  et ne sont donc pas concernés par la contrainte exprimée par la relation (6.9). Néanmoins, les valeurs choisies pour les termes notés \* influenceront sur les variations de stocks "cachés"  $\Delta S_4^{v-1}$  et  $\Delta S_5^{v-1}$  qui demeurent indépendants des bilans visibles au niveau  $v$ .

Les éléments de  $N_r^{v,v-1}$  peuvent être des fractions rationnelles : ici, la relation  $W_6^{v-1} = \frac{3}{2}W_2^v$  issue de (6.6), avec naturellement  $W_6^{v-1}$  et  $W_2^v$  entiers, traduit la correspondance suivante :

$W_2^v$	2	4	6	...
$W_6^{v-1}$	3	6	9	...

Comme on le voit Figure 6.8, la structure de données obtenue est récursive.

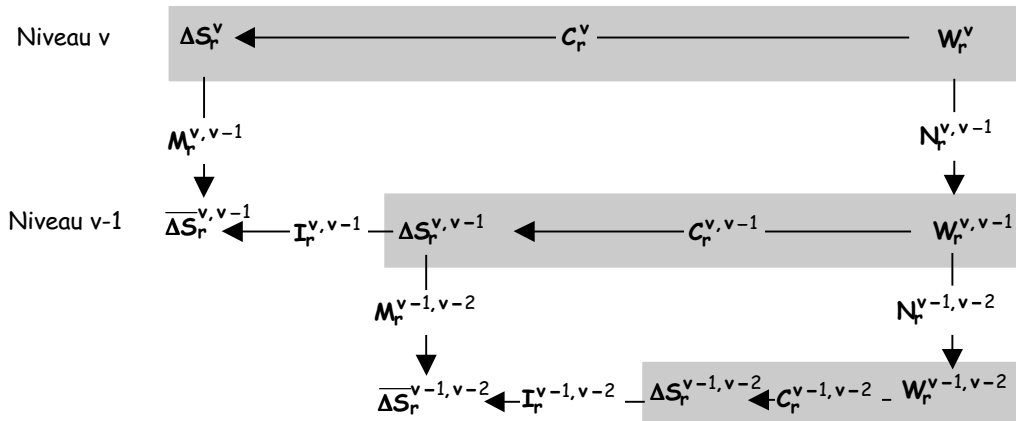


Figure 6.8 - Base de données multi-niveau

#### 1.2.4 Conclusion

Les processus de transformation généralisée impliquent deux types d'entités : les objets et les transformations. La désagrégation des processus peut donc être abordée selon trois points de vue :

- simultanément par rapport aux objets de la nomenclature et aux transformations,
- uniquement par rapport aux objets de la nomenclature,
- uniquement par rapport aux transformations.

Il appartiendra à l'analyste de procéder selon son entendement, en utilisant tout ou partie des mécanismes de modélisation que nous avons établis.

#### Désagrégation des processus par les objets

Une désagrégation par les objets limite le degré de détail des objets pris en compte à un niveau donné, permettant au gestionnaire de la ressource la plus agrégée (entreprise multi-site par exemple) de ne pas intégrer dans son calcul des composants élémentaires. En outre, ce type d'agrégation est implicite dans certaines décompositions fonctionnelles du système de production (cf § 1.1.1).

Mais l'avantage premier de cette agrégation est de structurer la démarche de planification :

- à chaque niveau  $v$  est évaluée (par la méthode proposée au chapitre 4) la quantité de travail nécessaire à la réalisation du carnet de commande produit confié à ce niveau,
- le passage du niveau  $v$  au niveau  $v-1$  est réalisé par l'affectation de certains de ces travaux aux ressources internes (niveau  $v-1$  de la prise de décision).

Cette affectation peut être effectuée en tenant compte des principes de placement de charge sur les ressources goulots comme le propose la méthode OPT .

L'itération de cette méthode à tous les niveaux de la nomenclature doit permettre, par rapport à la méthode MRP, d'augmenter la robustesse de la planification grâce au bouclage plan de charge /calcul des besoins nets qui ne peut être effectuée que selon une approche "essais erreurs", souvent effectuée par des opérateurs humains.

Une approche combinant la pseudo-inversion et les principes d'affectation de la méthode OPT est selon nous de nature à accélérer la convergence vers une solution d'affectation faisable, en planifiant à chaque niveau de la prise de décision les travaux des ressources critiques internes au niveau considéré.

#### Désagrégation des transformations

Chaque processus de transformation généralisé est la transcription détaillée d'une transformation de niveau supérieur. En descendant les niveaux, on éclate la nomenclature des transformations.

La décomposition structurelle du réseau de Petri qui consiste à développer certaines parties du modèle par

affinement des transitions relève en fait d'une décomposition par substitution [Suzuki,1983], [Béounes, 1983]. La planification résulte ainsi d'une approche descendante itérative qui permet, à chaque niveau de décision, de calculer les travaux et les quantités d'objets nécessaires à la réalisation des carnets de commandes confiés par le niveau supérieur.

Néanmoins, la désagrégation transformation/processus est un point délicat, car il importe que les bilans des travaux et des stocks soient cohérents d'un niveau à l'autre, condition que nous avons formalisée dans notre modèle. Il faut pour ce faire prêter attention non seulement aux poids affectés aux arcs du réseau de Petri représentant le processus détaillé, mais aussi à la structure de ce graphe, qui peut faire apparaître des processus alternatifs. Nous recommandons donc, en cas de processus alternatifs, d'agréger ceux-ci dans des transformations distinctes.

Il importe de noter, qu'en tout état de cause, la condition 6.9 garantit la cohérence de la décomposition transformation/processus.

## 2 L'INTEGRATION HORIZONTALE DES MODELES DE DONNEES

Les organisations réticulaires basées sur des partenariats d'entreprises pour la réalisation de carnets de commandes d'objets complexes sont axées sur le partage des activités de production entre plusieurs unités de production autonomes : les ressources de transformation. Ce partage d'activités implique en outre l'échange d'objets entre les différentes ressources/centres de conduite associés dont il faut s'assurer que la distribution sera cohérente avec l'activité globale de production.

On s'intéresse ici aux rapports entretenus par des centres de conduite d'un même niveau, caractéristiques de liens client/fournisseur ou donneur-d'ordre/sous-traitant. La difficulté de vérifier la cohérence des activités de centres de conduite participant à un même processus provient de ce que les nomenclatures des objets échangés ne sont pas nécessairement en accord<sup>41</sup> et que les ressources travaillent sur des segments distincts du processus de production. Il faut donc pouvoir vérifier que l'intégration des activités locales contribuant à une même chaîne de valeur ajoutée est bien cohérente avec l'activité globale à réaliser. Il s'agit d'établir les relations de cohérence entre les données réparties dans les centres d'un même niveau. Nous allons considérer des ressources réparties au niveau (v-1) elles-mêmes filles d'une ressource (r,v) en référence aux notations de la Figure 6.2. Pour plus de clarté, nous procédons dans un premier temps à l'intégration des modèles de données de deux centres de conduite de niveau v-1. Les résultats sont ensuite généralisés à un nombre quelconque de centres de conduite d'un même niveau.

### 2.1 Intégration des modèles de données de deux centres de conduite

#### 2.1.1 Association de processus locaux

Qu'il s'agisse d'une relation client/fournisseur, ou d'une relation donneur-d'ordre/sous-traitant, clients et sous-traitants réceptionnent des objets en provenance soit du fournisseur soit du donneur d'ordres<sup>42</sup> (Figure 6.9).

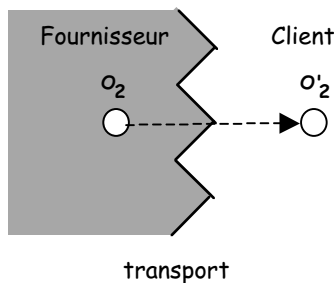


Figure - 6.9a - Relations client/fournisseur

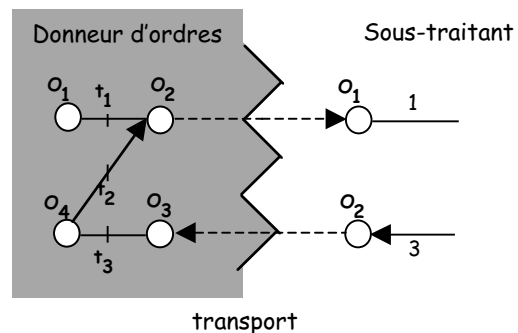


Figure - 6.9b - Relations donneur d'ordres/sous-traitant

<sup>41</sup> les nomenclatures sont en effet dans la plupart des cas locales à la ressource/centre de conduite

<sup>42</sup> dans le premier cas, le client attend du fournisseur la livraison de produits, dans le second cas, le donneur d'ordres fournit au sous-traitant l'ensemble des matières premières (objets entrants) nécessaires à la réalisation des transformations à effectuer.

Considérons les modèles de données locaux connus des centres de conduite  $(\alpha, v-1)$  et  $(\beta, v-1)$ , filles de  $(r, v)$ , soit pour mémoire:

$$\Delta S_{\alpha}^{v-1} = C_{\alpha}^{v-1} W_{\alpha}^{v-1} \text{ et } \Delta S_{\beta}^{v-1} = C_{\beta}^{v-1} W_{\beta}^{v-1}$$

Il s'agit d'obtenir un modèle intégré résultant du couplage des modèles locaux, de la forme

$$\Delta S_r^{v, v-1} = C_r^{v, v-1} W_r^{v, v-1} \tag{6.11}$$

où  $W_r^{v, v-1}$  est le vecteur travail quantifié en référence à la nomenclature  $T_r^{v, v-1} = T_{\alpha}^{v-1} \cup T_{\beta}^{v-1}$

$\Delta S_r^{v, v-1}$  le vecteur variation globale de stock<sup>43</sup> quantifié par la nomenclature  $O_r^{v, v-1} = O_{\alpha}^{v-1} \cup O_{\beta}^{v-1}$ . Il est égal au cumul des variations des stocks locaux  $\Delta S_{\alpha}^{v-1}$  et  $\Delta S_{\beta}^{v-1}$

Nous pensons qu'une telle intégration ne présente pas d'intérêt si les fabrications locales sont indépendantes (i.e.  $O_{\alpha}^{v-1} \cap O_{\beta}^{v-1} = \emptyset$ ), mais qu'elle est nécessaire pour vérifier la cohérence de processus segments d'une même chaîne de valeur ajoutée.

Deux types de couplage sont envisageables : le couplage série et le couplage parallèle :

- *le couplage série* : les sorties d'un processus de transformation (mis en œuvre par exemple par  $(\alpha, v-1)$ , Figure 6.10a) constituent les entrées du processus de transformation aval (mis en œuvre par exemple par  $(\beta, v-1)$ , Figure 6.10b). Ce type de couplage est typique des relations client/fournisseur (cf. Figure 6.11a).
- *le couplage parallèle* : les processus de production ont des entrées communes (matières premières communes) et /ou des sorties communes (processus de transformation différents aboutissant à la réalisation d'un objet identique). Ce type de couplage (Figure 6.11b) est représentatif de processus diversifiés, ou même, dans le cas où les entrées et les sorties sont communes, de processus alternatifs.

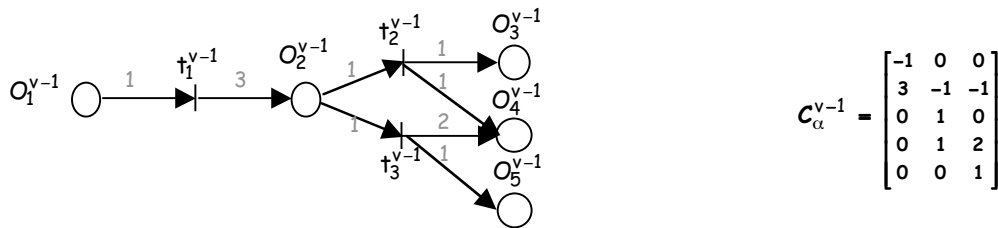


Figure 6.10a - Processus de transformation généralisé local à  $(\alpha, v-1)$

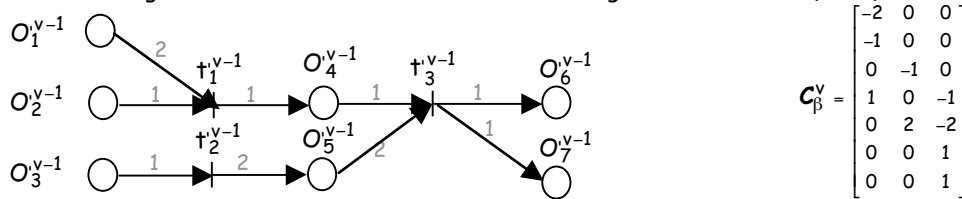


Figure 6.10b - Processus de transformation généralisé local à  $(\beta, v-1)$

Cas d'un couplage série :

Soit l'association série définie par  $(O_1^{v-1} \equiv O_5^{v-1}, O_3^{v-1} \equiv O_4^{v-1})$ . Cette association conduit à supprimer les références  $O_1^{v-1}$  et  $O_3^{v-1}$  ainsi qu'à rendre les variations  $\Delta S_5^{v-1}$  et  $\Delta S_4^{v-1}$  dépendantes respectivement des transformations  $t_2^{v-1}$  et  $t_1^{v-1}$ . Le processus de transformation généralisé global est obtenu par juxtaposition des objets communs à  $(\alpha, v-1)$  et  $(\beta, v-1)$ .

<sup>43</sup> stock "virtuel" de la ressource  $(r, v)$

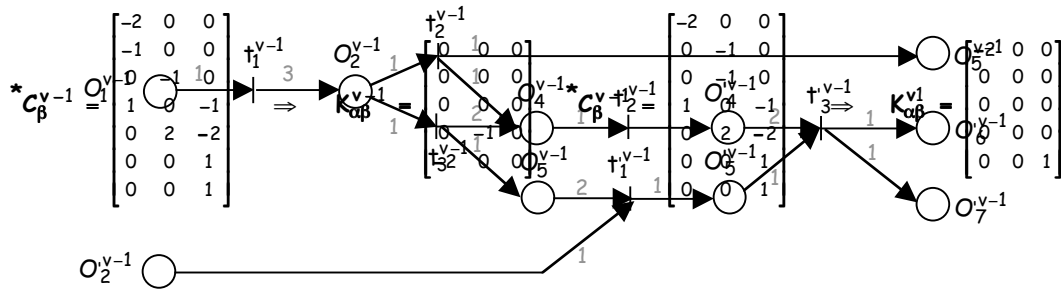


Figure 6.11a - Processus de transformation généralisé global résultant d'un couplage série

Cas d'un couplage parallèle :

Soit l'association parallèle définie par  $(O_1^{v-1} \equiv O_1^{v-1}, O_6^{v-1} \equiv O_6^{v-1})$ . Cette association conduit à supprimer les références  $O_6^{v-1}$  et  $O_6^{v-1}$  ainsi qu'à rendre les variations  $\Delta S_1^{v-1}$  et  $\Delta S_5^{v-1}$  dépendantes respectivement des transformations  $t_1^{v-1}$  et  $t_3^{v-1}$ .

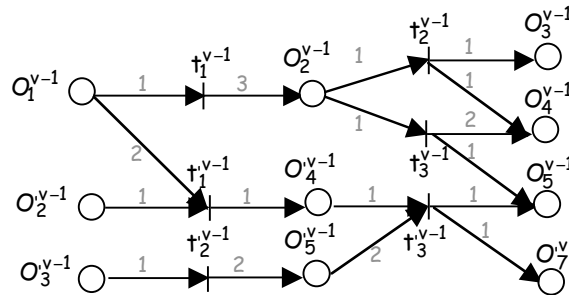


Figure 6.11b - Processus de transformation généralisé étendu résultant d'un couplage parallèle

### 2.1.2 Intégration

Soit  $q = \text{card } O_\alpha^{v-1} \cap O_\beta^{v-1}$ . La nomenclature objet  $O_r^{v,v-1}$  du modèle intégré compte  $m+m'-q$  références non redondantes (avec  $m = \text{card } O_\alpha^{v-1}$ ,  $m' = \text{card } O_\beta^{v-1}$ ). Nous choisissons arbitrairement de retenir les  $m$  références de la nomenclature  $O_\alpha^{v-1}$  et d'éliminer de la nomenclature  $O_\beta^{v-1}$  les  $q$  références communes.

En définitive, le processus intégré résultant de l'association des processus locaux est caractérisé par la matrice  $C_r^{v,v-1}$  de la forme :

$$C_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} C_\alpha^{v-1} & K_{\alpha\beta}^{v-1} \\ 0 & {}^*C_\beta^{v-1} \end{bmatrix}$$

${}^*C_\beta^{v-1}$  s'obtient en ôtant dans  $C_\beta^{v-1}$  les  $q$  lignes relatives aux références redondantes. Ces  $q$  lignes sont rapportées dans le bloc  $K_{\alpha\beta}^{v-1}$  matrice de couplage définissant le mode d'association des processus.

Dans notre exemple, on obtient :  
association série

association parallèle



$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|ccc|}
 \hline
 -2 & 0 & 0 \\
 \hline
 -1 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & -1 & 0 \\
 \hline
 1 & 0 & -1 \\
 0 & 2 & -2 \\
 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 \end{array} \\
 *C_{\beta}^{v-1} =
 \end{array}
 \Rightarrow
 K_{\alpha\beta}^{v-1} =
 \begin{array}{|ccc|}
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 \\
 -2 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|ccc|}
 \hline
 -2 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & -1 & 0 \\
 \hline
 0 & -1 & 0 \\
 \hline
 1 & 0 & -1 \\
 0 & 2 & -2 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 \end{array} \\
 *C_{\beta}^{v-1} =
 \end{array}
 \Rightarrow
 K_{\alpha\beta}^{v1} =
 \begin{array}{|ccc|}
 \hline
 -2 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 \end{array}$$

d'où le modèle de processus intégré :

$$C_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} C_{\alpha}^{v-1} & K_{\alpha\beta}^{v-1} \\ 0 & *C_{\beta}^{v-1} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 2 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]
 \quad
 C_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} C_{\alpha}^{v-1} & K_{\alpha\beta}^{v-1} \\ 0 & *C_{\beta}^{v-1} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 -1 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\
 3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]$$

Remarque : on vérifie que la variation des stocks d'objets communs à  $(\alpha, v-1)$  et  $(\beta, v-1)$  est le cumul des variations résultant des travaux  $W_{\alpha}^{v-1}$  et  $W_{\beta}^{v-1}$ .

L'équation fondamentale du processus de transformation généralisé global est donnée par :

$$\Delta S_r^{v,v-1} = C_r^{v,v-1} W_r^{v,v-1}$$

Le vecteur  $\Delta S_r^{v,v-1}$  a pour base la nomenclature objet

$$O_r^{v,v-1} = \left\{ O_1^{v-1}, O_2^{v-1}, O_3^{v-1}, O_4^{v-1}, O_5^{v-1}, O_2^{v-1}, \right. \\
 \left. O_4^{v-1}, O_5^{v-1}, O_6^{v-1}, O_7^{v-1} \right\} \quad \left| \quad O_r^{v,v-1} = \left\{ O_1^{v-1}, O_2^{v-1}, O_3^{v-1}, O_4^{v-1}, O_5^{v-1}, O_2^{v-1}, \right. \right. \\
 \left. \left. O_3^{v-1}, O_4^{v-1}, O_5^{v-1}, O_7^{v-1} \right\} \right.$$

Le vecteur  $W_r^{v,v-1}$  a pour base la nomenclature de transformation :

$$T_r^{v,v-1} = \left\{ t_1^{v-1}, t_2^{v-1}, t_3^{v-1}, t_1^{v-1}, t_2^{v-1}, t_3^{v-1} \right\} \quad \left| \quad T_r^{v,v-1} = \left\{ t_1^{v-1}, t_2^{v-1}, t_3^{v-1}, t_1^{v-1}, t_2^{v-1}, t_3^{v-1} \right\} \right.$$

Quel que soit le mode d'association, le travail résultant est :

$$W_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} W_{\alpha}^{v-1} \\ W_{\beta}^{v-1} \end{bmatrix}$$

Nous avons identifié l'interdépendance des processus de production locaux aux ressources  $(\alpha, v-1)$  et  $(\beta, v-1)$ . Ces liens laissent pendantes certaines entrées et sorties du processus de transformation : ce sont les objets entrants et sortants du processus global.

## 2.2 Généralisation

### 2.2.1 Cohérence statique

Considérons les  $R_r^v$  ressources internes à  $(r, v)$  dont les modèles locaux sont :

$$\Delta S_{r'}^{v-1} = C_{r'}^{v-1} W_{r'}^{v-1}, \quad r' = 1, \dots, R_r^v \quad (6.12)$$

L'équation de production relative au processus intégré est :



### 2.3 Conclusion

Nous avons formalisé les liens entre les modèles locaux de production et le modèle de production global d'une chaîne de valeur ajoutée mise en œuvre par un système distribué de production. La représentation intégrée exacte du processus de transformation généralisé global est obtenue, à un niveau quelconque, par concaténation des processus locaux. Qu'il s'agisse d'une démarche d'analyse (des données locales vers les données globales) ou au contraire de synthèse (des données globales vers les données locales), le respect des relations établies assure la cohérence globale des données réparties dans les centres de décision locaux.

### 3 CONCLUSION

L'architecture de conduite généralisée sur laquelle nous nous appuyons est basée d'une part, sur un mécanisme d'affinement récursif de décisions d'allocation (principe de désagrégation) et d'autre part, sur un mécanisme de répartition entre plusieurs centre de conduite de même niveau de ces décisions.

Ces mécanismes permettent de relier les vues disponibles aux différentes échelles de représentation du système productif (Figure 6.2) :

- une vue externe agrégée d'une ressource  $(r,v)$  révèle des données exprimées dans un vocabulaire  $(O_r^v, T_r^v, C_r^v, S_r^v, W_r^v)$ . C'est selon ce référentiel que la ressource se voit allouer un travail et l'approvisionnement ad hoc,
- la prise en compte de données locales au centre de conduite  $(r,v)$  permet de désagréger les données reçues, les traduisant dans un vocabulaire détaillé  $(O_r^{v,v-1}, T_r^{v,v-1}, C_r^{v,v-1}, S_r^{v,v-1}, W_r^{v,v-1})$ . C'est la vue externe détaillée de la ressource  $(r,v)$ ,
- enfin, une vue interne de  $(r,v)$  révèle un réseau de ressources  $\{(r',v-1)\}$  manipulant chacune un vocabulaire  $(O_r^{v-1}, T_r^{v-1}, C_r^{v-1}, S_r^{v-1}, W_r^{v-1})$ . On retrouve alors une vue externe agrégée de chaque ressource  $(r',v-1)$  ce qui dénote le caractère récursif de notre modélisation.

En liaison avec le chapitre 5, il est à noter que l'allocation d'un plan  $W_r^v$  à une ressource  $(r,v)$  est exprimée dans le vocabulaire du centre de décision "alloueur", à charge pour le centre de décision "alloué" de détailler ce plan en fonction des données complémentaires locales.

---

## Conclusion de la partie 2

Cette partie présente notre contribution à la conduite des organisations multi-site de production, et vise à fournir à tout décideur un cadre lui permettant de délimiter son espace de liberté décisionnelle. Nos travaux s'appuient sur l'architecture de conduite multi-niveau de production proposée par Zolghadri [Zolghadri, 1998] que nous généralisons afin de prendre en compte le caractère distribué de la décision.

Ainsi à chaque niveau décisionnel, plusieurs centres de conduite impliqués dans des relations génériques de type client/fournisseur ou donneur d'ordres/sous-traitant cohabitent. Ces centres de conduite gestionnaires de ressources plus ou moins agrégées sont chargés de coordonner l'activité de ces ressources au regard de leur environnement.

Le processus décisionnel d'un centre se décompose en deux phases :

- dans un premier temps, un calcul besoin/charge permettant d'évaluer la charge de travail d'un centre de conduite après réception de ses divers carnets de commande,
- dans un second temps, une allocation charge/ressources internes et/ou externes, intégrant les contraintes d'approvisionnement logistiques.

La modélisation par un Réseau de Petri du processus de production généralisé permet de raisonner analytiquement sur les objets et les transformations qui caractérisent le passage d'un objet d'un état à un autre. Sur la base de cette modélisation, il est possible de déterminer la quantité de transformations (travail/charge) induite par une commande d'objets en y intégrant des politiques de régulation de stock.

Une fois cette charge évaluée, il s'agit d'en programmer l'exécution dans le temps sur des ressources internes et/ou externes (obtenues par coopération). La planification et l'allocation de charges supposant la connaissance de la disponibilité des ressources de transformation, nous avons ici supposé ces données fournies dynamiquement par un tableau de bord. Cette allocation étant soumise, dans sa distribution temporelle, aux contraintes d'antériorité propres aux processus de fabrication, et, dans sa distribution spatiale, au respect des capacités des ressources, des règles visant à garantir la cohérence des décisions d'allocation ont été proposées. De plus, la logistique constituant un problème central dans la problématique de la planification des systèmes réticulaires, des contraintes d'approvisionnement logistique ont été intégrées.

Il est à noter que, dans le cadre de nos travaux, nous n'avons pas pris parti sur l'algorithme de décision qui relève de la responsabilité du décideur, tant la diversité des stratégies et des critères de performance est grande et propre à chaque application.

La réalisation d'un plan de charge amène un centre de conduite à organiser une allocation de travaux aux ressources internes et/ou externes. L'allocation induit donc une répartition de la charge entre plusieurs ressources. Cette allocation constitue pour chacune d'elles un plan de charge local défini sur un horizon plus court, qui peut à son tour donner lieu à un plan détaillé en référence aux nomenclatures et au processus généralisé propres à la ressource. Le passage d'un plan agrégé à un plan détaillé résultant d'une désagrégation, des règles visant à garantir la cohérence de la structure de données multi-niveau et répartie ont été proposées.

Le processus décisionnel général d'un centre de conduite et les données sous-jacentes sont présentés Figure C2.1. Un exemple récapitulatif fait l'objet de l'annexe 3.

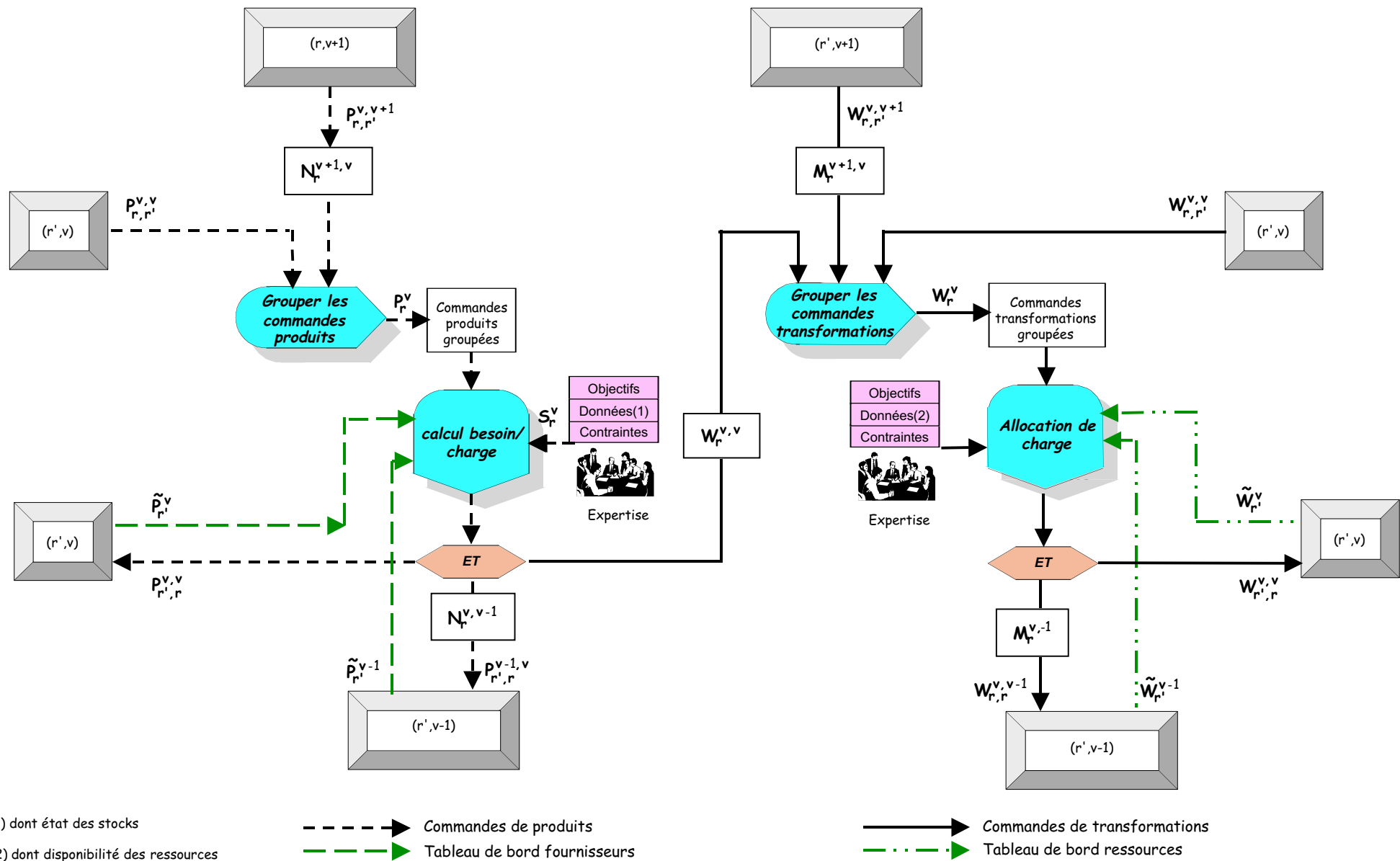
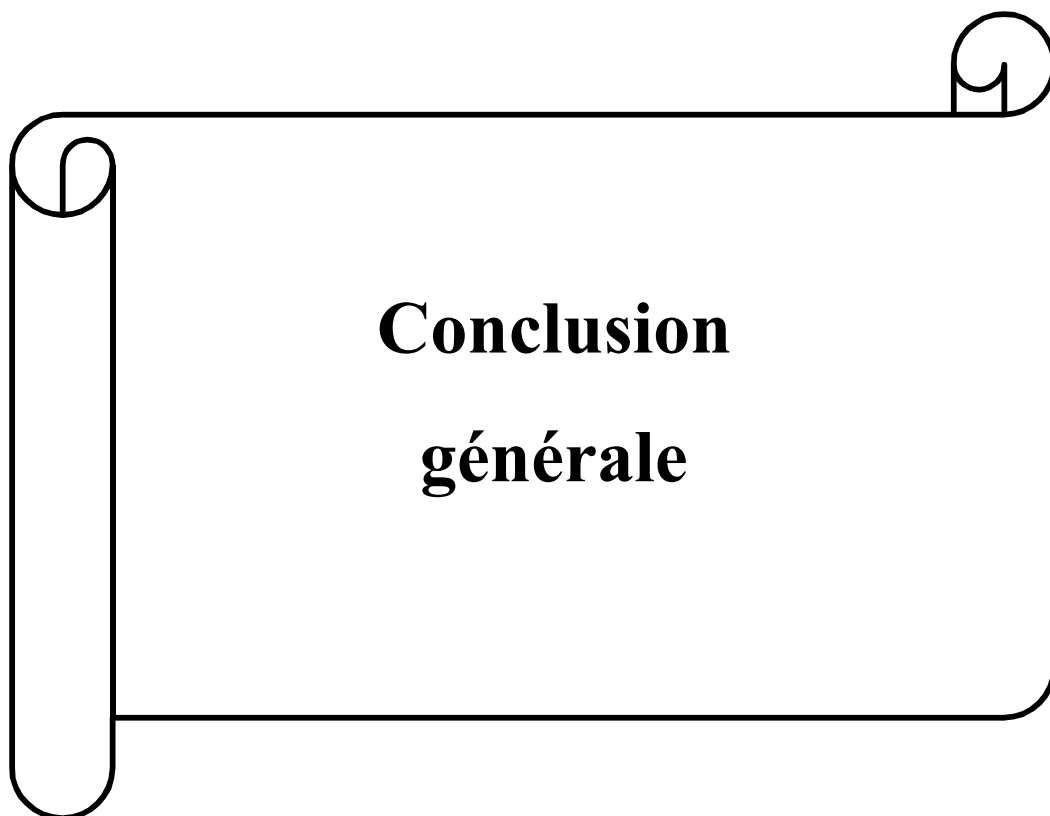


Figure C2.1 - Processus décisionnel d'un centre de conduite et données sous-jacentes



---



## Conclusion Générale

Ce travail relève de la modélisation algébrique des systèmes de production et de la conduite multi-niveau de ces systèmes. En complément des travaux développés au laboratoire sur la modélisation des ressources et l'élaboration de tableaux bord agrégés [Zolghadri, 98], nous avons ici concentré nos efforts sur la structure et la formalisation du système d'information nécessaire à la conduite, en tentant de généraliser la problématique de Gestion de Production aux systèmes réticulaires de production.

Nous avons cherché à produire une caractérisation formelle et générique des espaces de décision, et non pas de la décision elle-même qui renvoie à des critères souvent spécifiques intégrant, au-delà de la simple optimisation de la performance temporelle de production, des critères économiques et socio-techniques peu généralisables. En ce sens, cette recherche relève de l'Aide à la Décision en situation de planification.

Le propositions développées dans cette thèse ont été guidées par le cahier des charges suivant :

- produire un modèle générique quantitatif (et non pas simplement conceptuel) de données permettant d'asseoir et de cadrer le raisonnement de Gestion de Production étendue aux systèmes réticulaires,
- prendre en compte une large variété de contextes et modalités d'interactions de ressources au travers de liens de coopération et/ou de supervision,
- procurer des mécanismes de désagrégation de données basés sur une décomposition unifiée et récursive des données,
- garantir la cohérence du système d'information en dépit des principes de répartition et d'agrégation des données, qui seuls permettent de faire face à la complexité.

A partir d'un modèle de production unique caractérisant l'ensemble des processus faisables par une ressource, nous cadrans l'ensemble des modalités d'exploitation possibles, différant chacune par la politique de gestion des stocks et éventuellement par la quantité globale de travail requise. Un deuxième segment du raisonnement consiste à allouer le travail global aux ressources internes et externes exploitables, c'est-à-dire à ventiler dans l'espace et dans le temps des morceaux de travaux concourant au travail global. Le choix d'allocation est soumis à différentes contraintes, notamment d'antériorité (gammes), de capacité des ressources de transformation et de synchronisation logistique.

Ce modèle s'applique à tout niveau d'abstraction des entités ressources, travaux et stocks. Chaque niveau d'abstraction est la base d'un raisonnement plus ou moins agrégé. Le principe d'agrégation/désagrégation des données est en effet central dans cette thèse :

- concernant les ressources, il s'agit de lier une vue externe, unitaire, à une vue interne, réticulaire.
- concernant les travaux, il s'agit de lier la vue externe, unitaire, d'une transformation à la vue interne, réticulaire, révélant un processus détaillé.
- concernant les produits, il s'agit de lier la vue externe, unitaire, d'un objet abstrait (lot, collection) à la représentation interne révélant sa composition.

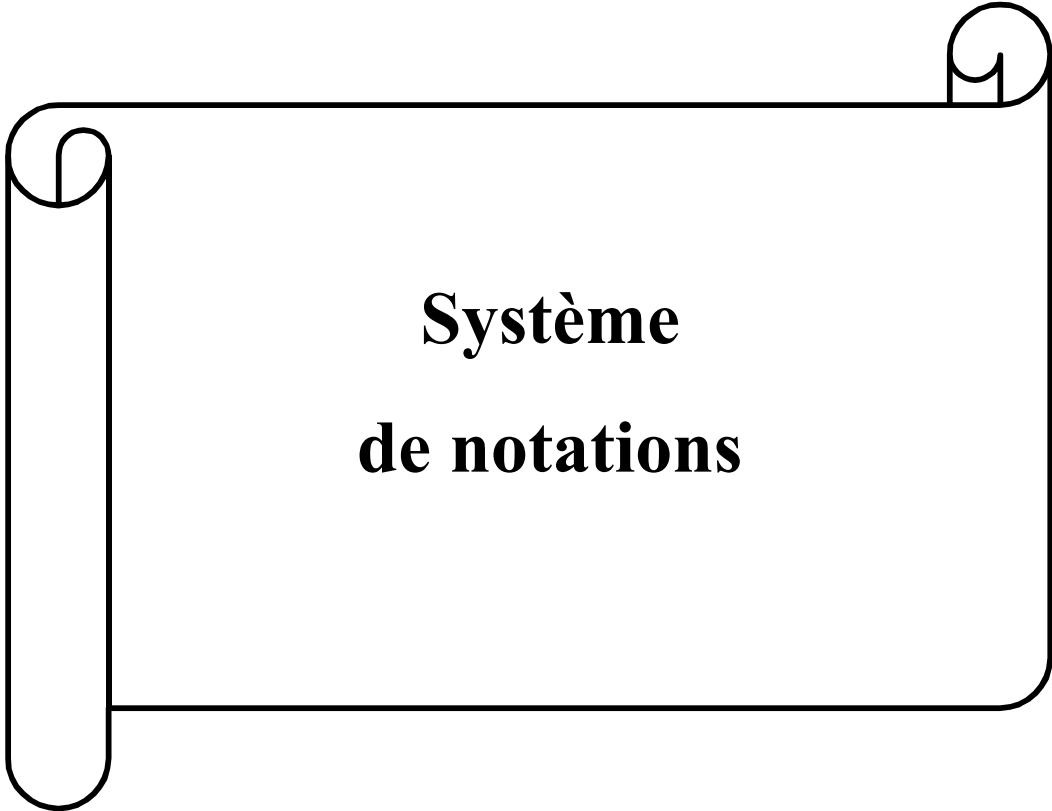
Ces résultats offrent une perspective de développement d'un outil avancé d'aide à la planification (APS) et de gestion de la chaîne logistique, ou du moins du noyau d'un tel outil, mieux adapté au contexte de l'Entreprise Etendue que les solutions ERP actuelles, qui tirent encore faiblement parti des principes

d'agrégation et de répartition du système d'information.

Néanmoins, notre travail ne considère que la planification statique d'activités. Un prolongement prioritaire sera donc de doter le modèle de données de mécanismes d'actualisation des plans au fur et à mesure de l'observation de l'activité réelle, c'est-à-dire de procéder à la 'mise en ligne' du système de conduite.

Enfin, au-delà de l'actualité des informations disponibles, la qualité de ces informations est un élément clé de la conduite, quel qu'en soit le niveau. Nous avons ici considéré que les capacités dynamiques des ressources virtuelles étaient connues au travers de tableaux de bord agrégés. Mais l'élaboration d'indicateurs agrégés pertinents demeure un vaste sujet encore peu étudié.

ooo





## Système de notations

### 1 CHAPITRE 4

Les ressources, le temps et le niveau sont implicites

$O$ ( $\text{Card}O = m$ )	nomenclature des objets.
$O_a, O_b$ et $O_c$	nomenclature des composants, produits semi-finis et produits finis
$T$ ( $\text{Card}T = n$ )	nomenclature des transformations
$S$ ( $S \in \mathbb{N}$ )	vecteur niveau de stock généralisé avant transformation
$S'$ ( $S \in \mathbb{N}$ )	vecteur niveau de stock généralisé après transformation
$\Delta S$	vecteur variation du stock généralisé
$\underline{S}, \bar{S}$	vecteur niveau de stock généralisé minimum respectivement maximum
$W$ ( $W \in \mathbb{N}$ )	vecteur travail généralisé
$C$	matrice d'incidence du processus de transformation généralisé
$\Delta \underline{S}, \underline{c}$	vecteur variation de stocks ciblés et matrice d'incidence associée
$\Delta \bar{S}, \bar{c}$	vecteur variation de stocks libres et matrice d'incidence associée
$C^+$	pseudo-inverse de $C$

### 2 CHAPITRE 5

Les ressources et le temps sont explicites, le niveau est implicite

$r, r = 1, \dots, R_r$	ressource pilotée
$H, h, k$	horizon, durée de période et numéro de période
$\hat{W}_r(h)$	vecteur charge allouée à la ressource $r$ sur la durée $h$
$\tilde{W}_r(h)$	vecteur charge disponible de la ressource $r$ sur la durée $h$
$d_r(W)$	délai nécessaire à la ressource $r$ pour réaliser le travail hétérogène $W$
$\hat{\Omega}_{rr'}(h)$	vecteur charge transportée durant la période $h$ du lieu de transformation $r'$ au lieu de transformation $r$

---

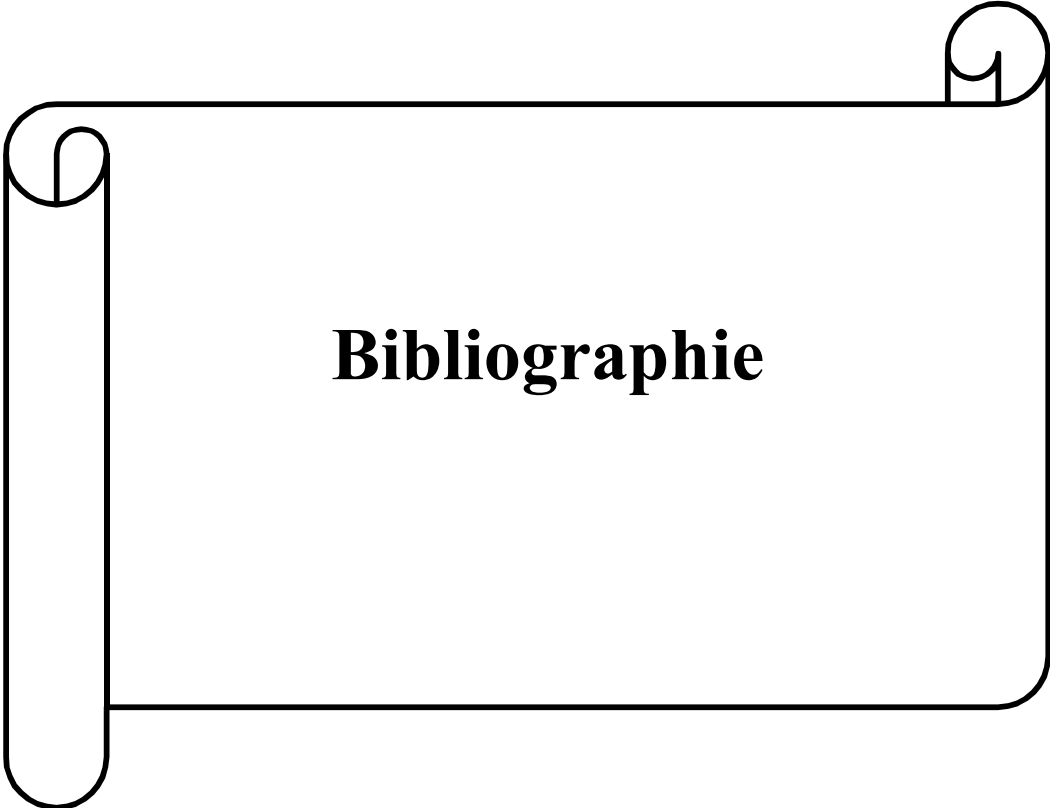
$\tilde{\Omega}_{r,r'}(h)$	vecteur charge <i>transportable</i> durant la période $h$ du lieu de transformation $r'$ au lieu de transformation $r$ .
$d_{r,r'}(\Omega)$	délai nécessaire à la ressource de transport $r' \rightarrow r$ pour réaliser le transport hétérogène $\Omega$ vérifie :
$\overset{\wedge}{\text{App}}_{r,r'}(k)$	quantité d'objets livrés à la ressource $r$ en provenance de la ressource $r'$ , période $k$
$\overset{\wedge}{\text{Exp}}_{r,r'}(k)$	quantité d'objets expédiés par la ressource $r$ à destination de la ressource $r'$ , période $k$
$S_r(k)$	stock général de la ressource $r$ au début de la période $k$ ,
$S'_r(k)$	stock d'objet de la ressource $r$ à la fin de la période $k$ .

### 3 CHAPITRE 6

Les ressources, le temps et le niveau sont explicites

$(\text{donnée})_r^v(k)$	données statiques et dynamiques associées à la ressource $(r,v)$ dans une représentation externe agrégée.
$(\text{donnée})_r^{v,v-1}(k)$	données statiques et dynamiques associées à la ressource $(r,v)$ dans une représentation externe détaillée.
$\mathfrak{R}_r^{v,v-1} = \{r', v-1\}$	ensemble des ressources internes à la ressource $(r,v)$
$\overline{O}_r^{v,v-1}$	nomenclature des objets de niveau $v-1$ dérivée de la nomenclature des objets de niveau $v$ ,
$\underline{O}_r^{v,v-1}$	nomenclature des objets de niveau $v-1$ introduits par désagrégation des transformations de niveau $v$ .
$\overline{\Delta S}_r^{v,v-1}$	vecteur stock des objets appartenant à la nomenclature $\overline{O}_r^{v,v-1}$
$M_r^{v,v-1}$	matrice de désagrégation des stocks
$N_{r,r}^{v,v-1}$	matrice de désagrégation des travaux

ooo







- [Aldanondo, 1992] M. Aldanondo, "Modélisation des données pour la planification et l'ordonnancement de la production: mécanismes d'agrégation et de désagrégation", Thèse de doctorat de l'institut des sciences appliquées de Toulouse, juillet 1992.
- [Anghern, 1992] A. Anghern, S. Dutta, "Integrating Case-Based Reasoning in Multi-Criteria Decision Support Systems", In JELASSI, T., KLEIN, M. R., et MAYON-WHITE, W., (eds.), Decision Support Systems: Experiences and Expectations, Proceedings of the IFIP TC8/WG 8.3 Working Conference on Decision Support Systems, pages 133-150, Amsterdam. North-Holland.
- [Anthony, 1965] R. Anthony, "Planning and control systems: a framework for analysis", Harvard University Press, Cambridge.
- [Ansoff, 1965] I. Ansoff, "Corporate strategy", Penguin Business, 1965.
- [Archimède, 2000] B. Archimède, L. Priem, T. Coudert, "Ordonnancement de production multi-site de production via COBRA", European Journal of Automation, vol 34, n°2-3, pp. 317-330, avril 2000.
- [Artigues, 1997] C. Artigues, "Ordonnancement en temps réel d'ateliers avec temps de préparation des ressources", Thèse de doctorat de l'université P. Sabatier, décembre 1997.
- [Axater, 1984] S. Axsater, H. Jonsson, "Aggregation and disaggregation in hierarchical production planning", European Journal of Operation Research, vol 17, n°3, pp.338-350, 1984.
- [Axater, 1986] S. Axsater, "On the feasibility of aggregate production plan", Operation Research, vol 34, pp. 796-800, 1986.
- [Barraux, 1997] J. Barraux, "Entreprise et performance globale : outils, évolution, pilotage", Economica, 256 pages, Novembre 1997
- [Bellman, 1982] R. Bellman, A.O. Esogbue, I. Nabeshima, "Mathematical aspects of scheduling and applications", Pergamon Press, 1982.
- [Beounes, 1983] C. Beounes, "Stochastic Petri net modeling for dependability evaluation of complex computer systems" Proceedings of the International Workshop on timed Petri Nets, Torino, Italy, pp. 191-198, juin 1985.
- [Bérard, 2000] C. Bérard, J.C. Deschamps, "Classifying Cooperation Forms in Distributed Autonomous Systems", Preprints of the Advanced Institute Summers ASI'00, pp. 3-6, Bordeaux, France, 18-20 septembre 2000.
- [Billaut, 1993] J.C Billaut, "Prise en compte des ressources multiples et des temps de préparation dans les problèmes d'ordonnancement en temps réel", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1993.
- [Bitran, 1981] G.R. Bitran, E.A. Hass, A.C.Hax, "Hierarchical production planning : a single stage system", Operation research, vol 29, 1981.
- [Blackwell, 1999] Roger D. Blackwell, Kristina Blackwell, "The century of the Consumer : Converting Supply Chains into Demand Chains", Supply Chain Management Review (<http://www.manufacturing.net>), october 1, 1999.
- [Bloch, 2000] M. Bloch, Y Pigneur, "L'émergence de la virtualité - un panorama », Publication du bulletin HEC, <http://inforge.unil.ch/gradues/bull-55/bloch.htm>
- [Boucon, 1991] D. Boucon, "Ordonnancement d'atelier : aide au choix de règles de priorité", Thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, janvier 1991.
- [Bourrières, 1998] J.P. Bourrières, "Multilevel algebraic modelling of complex manufacturing tasks", Proceedings of the IFAC IMS'98, pp. 261-265, Porto alegre, Nov 9-11, 1998.

- [Bourrières, 2001] J.P. Bourrières, T. Lecompte, J.C. Deschamps, R. Alami, "Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production distribués", à paraître dans the European Journal of Automation.
- [Brenot, 1996] J. Brenot, L. Tuvee, "Le changement dans les organisations", Paris, Presses Universitaires de France, 1996.
- [Calvi, 1999] R. Calvi, "L'externalisation des activités d'achat : l'apport du modèle contractualiste appliqué au processus d'achat", Finance, Contrôle, Stratégie, II, 1, 27-47 (repris dans la Revue Internationale de l'achat, vol. 19, n°1, pp. 19-27), 1999.
- [Camalot, 2000] J.P. Camalot, "Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources", Thèse de doctorat de l'université P. Sabatier, mai 2000.
- [Chu, 1995] C. Chu, "Ordonnancement de la production : approches théoriques nouvelles", Habilitation à diriger des recherches, Université de Metz, 1995.
- [Cardeira, 1994] C. Cardeira, Z. Mammari, "Ordonnancement de tâches dans les systèmes temps réel et répartis : algorithmes et critères de classification", APII. Vol. 28, n°4, pp. 353-384, 1994.
- [Capet, 1996] M. Capet, "Sous-traitance", Extrait de l'encyclopédie de gestion, tome III, 1996.
- [Cappelli, 1999] Cappelli, "Les PME optent pour le WEB/EDI", logistique magazine, n°137, mai 1999
- [Carlier, 1988] J. Carlier, P. Chretienne P., "Problèmes d'ordonnancement : modélisation/ complexité/ algorithme", Editions Masson, 1988.
- [Chep, 1999] A. Chep, L. Tricarico, "Object oriented analysis and design of a manufacturing feature representation", International Journal of Production and Research, vol.37, n°10, 1999, p.2349-2376.
- [Childe, 1998] S. Childe, " The extended entreprise- a concept of cooperation", Production Planning and Control, Vol 9, n°4, pp. 320-327, 1998.
- [Cocula, 1999] F. Cocula, "Introduction générale à la gestion", Editions Dunod, 1999.
- [Comvopoulos, 1998] Comvopoulos, "Intranet au service de la logistique", Revue annuelle des Elèves des Arts et Métiers, Dunod, Paris, 1998.
- [Courtois, 1995] A. Courtois, M. Pillet, C. Martin, "Gestion de production", Editions d'Organisation, 1995.
- [Camarinha-Matos, 1997] Camarinha-Matos, Afsramenesh, "Flexible coordination in virtual entreprise" <http://uninova.pt/~prodnet/papers.html>.

---

## D, E, F

- [Dantzig, 1947] G.B. Dantzig "Linear Programming and Extensions", Princeton New Jersey, 1969.
- [Dauzere-Peres, 1992] S. Dauzere-Peres, "Planification et ordonnancement de la production : une approche intégrée cohérente". Thèse de doctorat de l'université P. Sabatier, Toulouse, Rapport Laas n° 92129
- [David, 1989] R. David, H. Allah, "Du grafcet au réseau de Petri", Editions Hermès, 1989.
- [Davidow, 1997] W. Davidow, M. Malone, "L'entreprise à l'age du virtuel", Editions Maxima, Paris, 1997.
- [Descottes, 1997] B. Descottes-Genon, F. Chetouane, D. Chenon, A. Landrieu, C. Sassine, "Logistics, Maintenance, Production in virtual entreprise", Proceedings of the MCPL'97, Campinas (Brazil), pp. 47-52., 1997.
- [Disco, 1992] "Software developpment", deliverable 5 du projet ESPRIT 5178, juillet 1992

- [Dombre, 1989] E. Dombre, W. Khalil : Modélisation et commande des robots : Résolution des systèmes d'équations linéaires", Editions Hermès, 1989.
- [Doumeingts, 1984] G. Doumeingts, "Méthode GRAI : Méthode de conception des systèmes de productique", These d'etat en Automatique, Université Bordeaux I, 1984.
- [Doumeingts, 1994] G. Doumeingts, B. Vallespir, "Gestion de production", Collection technique de l'ingénieur, GRAI/ LAP, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1994.
- [Doumeingts, 1998] G. Doumeingts, B. Vallespir, D. Chen. - Decisional Modelling GRAI grid. - chapter 14 of the International Handbook on information systems, Ed. P. Bernus, K. Mertins & G. Schmidt - Springer Verlag, Heidelberg, pp. 313-337, 1998.
- [Dubois, 1983] D. Dubois, K.E. Stecke, "Using Petri nets to represent production processes", Proc. of the 22<sup>nd</sup> IEE CDC, pp. 1062-1067, décembre 1983.
- [Erschler, 1976] J. Erschler, "Analyse sous contrainte et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement, Thèse de doctorat d'état de l'université P. Sabatier, Toulouse, 1976.
- [Fénié, 1994] P. Fénié, "GRAICO : méthode de modélisation et de conception de systèmes d'exploitation des systèmes de production", Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1997.
- [Ferber, 1989] J. Ferber, "Eco problem solving : how to solve problem by interactions", Proceedings of the Ninth Workshop on distributed Artificial Intelligence, Rosario Resort, Eastsound, Washington, September 1989, p.113-128.
- [Fontan, 1985] G. Fontan, S. Imbert, C. Mercé, "Consistency analysis in a hierarchical production planning system", Enginnering Costs and Production Economics, vol 9, 1985.
- [Fontan, 1997] G. Fontan, C. Merce, J.B Lasserre, "Concepts et outils pour les systèmes de production", Cépaduès Editions, Coordination : JC. Hennet, Partie I - Chapitre 1, pp.13-21, 1997.
- [Fox, 1987] Fox, M.S., "Beyond the knowledge level", in: Kirschberg, L. (ed.), Expert database systems, Benjamin/Cummings Publishing, 1987.
- [Frankwick, 1995] G.L. Frankwick, K. Elston, L. Laubach, " Motivators and barriers to participating in a virtual entreprise" 1995.
- [Freitas, 2000] M. Freitas, "Dossier spécial Supply Chain Management : Optimisons les transports", CXP Informations n°255, pp.58-59, 1999.

---

## G, H, I

- [Gallois, 1989] P.M. Gallois, "De la pierre à la cathédrale", Editions , 1989.
- [Gershwin, 1989] S.B. Gershwin "Hierarchical flow control : a framework for scheduling and planning discrete events in manufacturing systems", Proceedings of the IEEE, vol 77 n°1, pp. 195-209, janvier 1989.
- [Gershwin, 1994] S.B. Gershwin "Manufacturing systems engineering", Prentice Hall, 1994.
- [Giard, 1988] V. Giard, "Gestion de la production", Editions Economica, 1988.
- [Goldratt, 1992] Goldratt, Eliyahu, M., y Jeff Cox, "The Goal", Croton-on- Hudson, Estados Unidos, North River Press, 1992.
- [Goldratt, 2000] Goldratt, Eliyahu M., "Necessary But Not Sufficient", Estados Unidos, North River Press, 2000.
- [Gorla, 1984] B. Goolra, M. Renaud, "Modèles des robots manipulateurs : application à leur commande", Cépadues Editions, Toulouse, 1984.
- [Gornev, 1997] V.F. Gornev, V.B Rarassov, R. Soenen, C. Tahon, "Virtual entreprise : reasons sources and tools", Proceedings of the MCPL'97, Campinas (Brazil), pp.53-58., 1997

- [GOTHA, 1993] GOTHA, " Les problèmes d'ordonnancement", Recherche opérationnelle vol 27, n°1, 1993, p. 77 à 150.
- [Gratacap, 1999] A.M. Gratacap, "La gestion de production". Editions Dunod, 1999.
- [Gunasekaran, 1992] A. & Goyal, S.K. & Martikainen, Teppo & Yli-Olli, Paavo, "Modelling the turnover rate of production system as a performance indicator", International journal of operations and production management 12:6, 44-55, 1992.
- [Guinet, 1997] A. guinet, "A multi-site production management approach", European Journal of Automation, vol 34, n°2-3, pp. 367-377, avril 2000.
- [Hax, 1975] A.C. Hax, H.C. Meal, "Hierarchical Integration of Production planning and Scheduling", TIMS Studies in Management Science, vol 1, Logistics, North Holland/ American Elsevier, New York, 1975.
- [Hétreux, 1995] G. Hétreux, G. Fontan, C. Merce "Etude de processus décisionnels en planification hiérarchisée", 5eme Congrès international de Génie industriel (GI'5), Grenoble, 1995.
- [Hétreux, 1996] G. Hétreux, "Structure de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions", Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées, décembre 1996.
- [Hewitt, 1973] C.E. Hewitt, P. Bishop, R. Steiger, "A universal modular actor formalism for artificial intelligence", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IJCAI, Stanford, California 1973.

---

## J, K, L

- [Jagdev, 1998] H.S. Jagdev, J. Browne, "The extended enterprise - a context for manufacturing". Production Planning and Control, Vol 9, n°3, pp.216- 229, 1998.
- [Kamath, 1990 ] M. Kamath, N. Viswanadham, "Applications of Petri net based models in the modelling and analysis of flexible manufacturing systems", IEEE press tutorial edited by Alan. A. Desrochers on Modelling and control of automated manufacturing systems, USA, pp. 262-267, 1990.
- [Koenig, 1996] G. Koenig, "Management stratégique" Editions Nathan, Paris, 1996.
- [Lasserre, 1989] J.B. Lasserre, " A tentative model for consistent hierarchical production planning and scheduling", rapport LAAS n° 89 030. A paraître dans Management Sci sous le titre : An integrated model for job-shop planing and scheduling.
- [Lasserre, 1992] B. Lasserre, "An integrated Model for Job-Shop planning and scheduling". Management Science 38, 1201-1211.
- [Lecompte, 1999] T. Lecompte, J.P. Bourrières, " Un modèle linéaire de production discrète, calcul de besoin et de charge par pseudo-inversion". Actes des journées doctorales d'Automatiques, GdR Automatique, pp 325-328, Nancy 21-23 septembre 1999.
- [Lecompte, 1999] T. Lecompte, J.C. Deschamps, J.B. Bourrières, " A data model for generalised scheduling for virtual enterprise ". Proceedings of IFIP WG5,7 SIG on ATPPC'99, pp 87-96, Hanover, Feb. 11-12, 1999.
- [Lecompte, 2000] T. Lecompte, J.P. Bourrières, "Data Model and Decision Support Framework For Generalised Production Management in the Extended Enterprise". Proceedings of the MCPL'00, pp ,Grenoble 5-8 juillet, 2000.
- [Lee, 1993] J.H.M. Lee, M.H. Van Emden, "Interval computation as deduction in CHIP", Journal of Logic Programming, vol 16, pp. 255-276, 1993
- [Le Page, 1993] P. Lepage, "Analyse des relations clients-fournisseurs par une approche multi-agent", Thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de

Toulouse, Décembre 1993.

- [Le Pape, 1989] P. Le Pape, "Les systèmes d'ordonnancement flexibles et opportunistes", Thèse de doctorat de l'université Paris Orsay, 1989.
- [Lopez, 1991] P. Lopez, "Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources", Thèse de doctorat, Université P. Sabatier, Toulouse, 1991.
- [Loupil, 1998] Loupil, 1998, "l'entreprise au plus juste et la logistique : logistique et maîtrise des flux", Revue annuelle des élèves des arts et métiers, Dunod, Paris, 1998

---

## M, N, O

- [Marcotte, 1995] F. Marcotte, "Contribution à la modélisation des systèmes de production : extensions du modèle GRAI", Thèse de l'université Bordeaux I, Octobre 1995.
- [Martin, 1997] Martin, "ECR (réponse efficace au consommateur) : démarche et composantes. Editions Aslog, 1997.
- [Mathe, 1998] H. Mathe, D. Tixier, "La logistique", collection des Presses Universitaires Françaises n° 2351, 1998.
- [Meier, 1989] K. Meier, "Commande hiérarchisée d'un système de production", Thèse de doctorat de l'Université de Metz, janvier 1989.
- [Mercé, 1987] C. Mercé "Cohérence des décisions en planification hiérarchisée" Thèse d'état de l'Université P. Sabatier de Toulouse, juillet 1987.
- [Mercé, 1997] G. Fontan, C. Merce, J.B Lasserre, "Concepts et outils pour les systèmes de production", Cépaduès Editions, Coordination : J.C. Hennet, Partie I - Chapitre 1, pp.13-21, 1997.
- [Mesghouni, 1998] K. Mesghouni, S. Hammadi, P. Borne, "On modelling genetic algorithms for flexible job-shop scheduling problems" Studies in informatics and control, vol7, n°1, pp. 37-47, march, 1998.
- [Mestoudjian, 1987] J. Mestoudjian, J. de Crescenzo, "La gestion de production assistée par ordinateur", tomes I et II, Editions de l'usine nouvelle, 1987.
- [Moudden, 1997] A. Moudden, " GIMxpert et GIMcase. : une méthode et des outils pour concevoir les Systèmes de Production" Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1997.
- [Nagar, 1995] A. Nagar, J. Haddock, S. Heragu, "Multiple and bicriteria scheduling : a literature survey", European Journal of operation research, 81, 1995.
- [Orlicky, 1975] Orlicky, "Material Requirement Planning", Editions Mc Graw- Hill, 1975

---

## P, Q, R

- [Park, 1995] L.J. Park, C.H. Park, "Application of genetic algorithm to job-shop scheduling problems with active schedule constructiv crossover", Proceeding of IEEE/SMC, volume 1, pp. 530-535, October 22-25, 1995.
- [Polge, 1999] C. Poldege, "Dossier spécial Supply Chain Management : L'auberge espagnole de la logistique", CXP Informations n°255, pp.58-59, 1999
- [Porter, 1986] M. Porter, "L'avantage concurrentiel: comment devancer ses concurrents et maintenir son avance", InterEditions, Paris, 1986.
- [Portman, 1988] M.C. Portman, "Méthodes de décomposition spatiale et temporelle en ordonnancement de la production", RAIRO-APII, vol 22 n°5, pp. 439-451, 1998.

- [Portman, 1994] M.C. Portmann, V. Bolzoni, "Specific developments or general software adaptation in order to solve some scheduling or production manufacturing problems", proceedings of the 4<sup>th</sup> International workshop on Project Management and Scheduling, Leuven, pp.192-197, 1994.
- [Power, 2000] D. Power, "Decision Support Systems Hyperbook", Cedar Falls. IA : DSSResources.com, Fall 2000 (<http://dssresources.com/dssbook>).
- [Rabelo, 1998] R.J. Rabelo, L.M. Camarinha-Matos, "Generic Framework for Conflict Resolution in Negotiation-based Agile Scheduling Systems", Proceedings of the IMS'98-5<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Gramado, Brazil, Nov 1998.
- [Ramanantsoa, 1997] B. Ramanantsoa, "Stratégie", Encyclopédie de gestion, sous la direction de Y. Simon, P. Joffre, Editions Economica, 2eme édition, Paris, 1997.
- [Renouard, 2000] V. Renouard, "Progiciels APS", L'usine nouvelle : le guide de l'industrie, hors série , pp.124-128, juillet 2000.
- [Rota, 1998] K. Rota, "Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources : application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique", Thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, janvier 1998.
- [Roux, 1997] W. Roux, "Une approche cohérente pour la planification et l'ordonnancement de systèmes de production complexes". Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, Rapport Laas n° 97248
- [Roux, 1999] W. Roux, S. Dauzere-Peres, J.B. Lasserre, "Planning and scheduling in multi-site environment". Production planning and Control, vol 10, n°1, pp. 19-28, 1999
- [Roy, 1970] B. Roy, "Algèbre moderne et théorie des graphes", vol III, Editions Dunod, 1970

---

## S, T, U

- [Tarondeau, 1993] J.C. Tarondeau, "Stratégie industrielle", Editions Vuibert, 1993
- [Tarondeau, 1997] J.C. Tarondeau, "La flexibilité", Collection des Presses Universitaires Françaises n° , 1997.
- [Sihn, 1998] W. Sihn, D.A. Collier, D.D. Wilson, "Supply management orientation and supplier/buyer performance", Journal of Operations Management, vol 18, pp. 317,333, 2000.
- [Schneider, 1997] D. K. Schneider, "Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat de la Faculté des Sciences Economiques et Sociales de l'université de Genève, Genève, 1997.
- [Schrague, 1978] L. Schrague, K. Baker, "Dynamic programming solutions of sequencing problem with precedence constraints" Operation Research, vol 26, pp. 444-449, 1978.
- [Soubie, 1994] J.L. Soubie, A.H. Kacem, "Modèles de coopération Homme / Système intelligent", dans "Systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception", (B. Pavard ed.), Octarès Editions, Toulouse, 1994.
- [Talbi, 1991] E.G. Talbi, P. Bessière, "Superlinear speedup of a parallel genetic algorithm on the SuperNode", SIAM News, Vol. 24, n° 4, pp. 12-27, Jul 1991.
- [Taylor, 1911] Taylor, "Principles of scientific management", éditions Dunod, Paris, 1911
- [Tixier, 1981] Tixier, Mathe, Colin, "La logistique au service de l'entreprise, Dunod entreprise, Paris, 1981.
- [Thierry, 1994] C. Boronad-Thierry, "Planification et ordonnancement multi-site : une approche par satisfaction de contraintes", Thèse de doctorat de l'université P. Sabatier de Toulouse, janvier 1994.

## V, W, X, Y, Z

---

- [Van Laarhoven, 1992] P.J.M. Van Laarhoven, E.H.L. Aarts, J.K. Leustra, "Job shop scheduling by simulated annealing", *Operation Research*, vol 40, pp. 113-125, 1992.
- [Warnecke, 1993] H.J. Warnecke, "The Fractal Company : A Revolution in Corporate Culture", Springer Verlag, 1997.
- [Zhao, 1999] Zhao, "A consistent manufacturing data model to support virtual enterprises", *International Journal of Agile Management System*, vol. 1, n°3, pp.150,158, 1999.
- [Zheng, 2001] Y. Zheng, J.P. Bourrières, "A programming method for load planning in manufacturing systems", *Proceedings of IFAC/IMS'01 conference*, Poznan, 24-26 April 2001.
- [Zolghadri, 1998] M. Zolghadri, "Contribution à la modélisation agrégée des systèmes de production discrete", Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1998.
- [Zuurbier, 1992] J. Zuurbier, "On the Design of Group Decision Support Systems", *Proceedings of the IFIP TC8/WG 8.3 Working Conference on Decision Support Systems*, pp.59-70, Amsterdam, North-Holland.

ooo

---





---

# Le formalisme GRAI

D'après [ Fénié, 1994]

Le pilotage de l'entreprise consiste, par un processus décisionnel, à synchroniser l'ensemble des activités de production, depuis l'acquisition des matières et des composants chez les fournisseurs jusqu'à la mise à disposition du produit au client. Le pilotage consiste donc à synchroniser, dans le temps, la disponibilité des produits à transformer (décisions de flux) et celle des ressources nécessaires à cette transformation (décisions de capacité), niveau par niveau.

Le formalisme GRAI est un formalisme opérationnel qui permet de modéliser le système de décision de l'entreprise. La combinaison de la grille et des réseaux permet de représenter la structure globale du système de décision, puis d'analyser le fonctionnement des différents éléments de cette structure, soit dans notre cas, le processus décisionnel d'un centre de décision.

Nous avons utilisé dans cette thèse quelques concepts de la grille GRAI. Nous détaillons dans cette annexe les concepts présentés au chapitre 4 et présentons ensuite les concepts de base des réseaux GRAI qui nous ont servi à modéliser le processus décisionnel d'un centre de conduite impliqué dans la conduite d'un système de production réticulaire.

## 1 LA GRILLE GRAI

La grille GRAI permet la représentation globale de la partie décisionnelle de l'entreprise (système de conduite de production). Elle se présente sous une forme matricielle illustrant la double décomposition fonctionnelle et temporelle. Les concepts manipulés au niveau de la grille sont les suivants :

- les fonctions,
- les niveaux décisionnels (couples Horizon/Période),
- les centres de décision et leur structure,
- les flux d'informations,
- les informations internes et externes.

### 1.1 Les fonctions

Une fonction est le regroupement d'activités de décision ayant un rôle concourant à une finalité commune et identifiée. Les fonctions étant représentées dans les colonnes, nous retrouvons dans la grille les trois fonctions de base : *Gérer les Produits* (flux) et *Gérer les Ressources* (capacité) qui sont synchronisées par la fonction *PLANIFIER*. Selon l'étendue du cas étudié ou le degré de détail souhaité pour l'analyse, il est possible d'ajouter certaines fonctions spécifiques ayant des influences pour le pilotage (*Gérer la Qualité*, *Gérer la Maintenance*, ...).

### 1.2 Les niveaux décisionnels

Un niveau décisionnel est défini par un couple Horizon/Période (H/P). Cette notion de couple H/P est un critère de décomposition lié aux caractéristiques temporelles des décisions.

- L'*horizon* correspond à la durée de la portée de la décision. C'est l'intervalle de temps pour lequel les décisions ont une certaine validité.
- La *période* est l'intervalle de temps au bout duquel il est nécessaire de remettre en cause les décisions élaborées sur l'horizon considéré. Lorsqu'une période est terminée et qu'on ajoute une durée de temps équivalente à l'horizon, on parle d'horizon glissant.

Les niveaux décisionnels sont représentés horizontalement dans la grille. On aura au minimum trois niveaux décisionnels dans la configuration de base de la grille pour représenter les niveaux stratégique, tactique et opérationnel (long terme, moyen terme et court terme) [Doumeingts 84].

### 1.3 Les centres de décision

Les centres de décision se définissent conceptuellement comme étant à l'intersection d'une fonction et d'un niveau décisionnel. Ils regroupent exclusivement les activités appartenant à la même fonction et au même niveau décisionnel. Leur structure sera détaillée en utilisant les réseaux GRAI.

### 1.4 Les flux d'informations

Les flux d'informations sont représentés par une flèche dont l'origine est le centre de décision émetteur ou l'énoncé de l'information externe ou interne, et l'extrémité, le centre de décision destinataire. Il existe deux types de liens :

- le lien décisionnel ou cadre de décision, correspond à l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision d'un centre de décision,
- le lien informationnel correspond à un ensemble de données fournies par un autre centre de décision ou par l'environnement.

### 1.5 Les informations externes et internes

Représentées en colonnes comme les fonctions, ces informations internes et externes servent à indiquer les interfaces informationnelles du système étudié avec son environnement et avec son système physique.

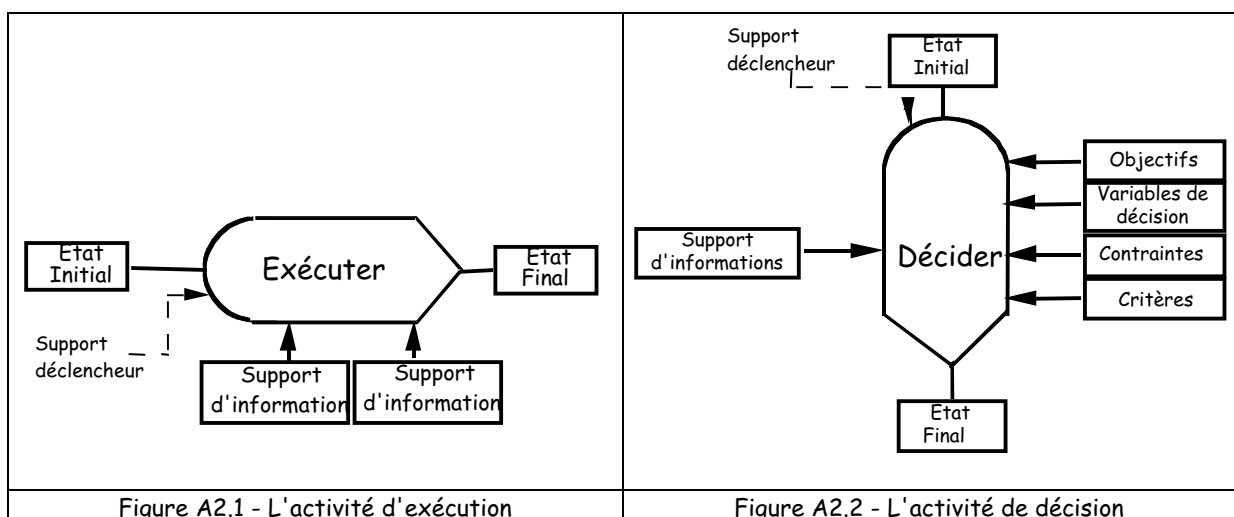
## 2 LES RESEAUX GRAI

Reliés au modèle conceptuel de référence d'un centre de décision, les réseaux GRAI ont pour objectif la description détaillée des activités des centres de décision identifiés dans la grille GRAI. Les concepts manipulés au niveau du réseau sont les suivants :

- les activités,
- les supports d'informations,
- les opérateurs logiques,
- les symboles de communication.

### 2.1 Les activités

Une activité est un processus de traitement de l'information réalisé avec un certain nombre de supports, un ou plusieurs déclencheurs et produisant un résultat. Les activités sont des activités de décision ou d'exécution. Elles sont représentées ci-dessous Figures A2.1 et A2.2.



L'activité de décision se caractérise par un ensemble de supports obligatoires à son déroulement. Ils sont de type Objectif, Variable de décision, Contrainte, Critère (cf. Chapitre 4).

## 2.2 Les supports d'informations

Les supports d'informations représentent toutes les informations nécessaires à l'accomplissement de l'activité. Ils peuvent être de différents types :

- Information simple : donnée utilisée par l'activité,
- Ressources : moyen ou matériel qui supporte le traitement de l'activité,
- Variable de décision : élément ou donnée sur lequel le décideur peut agir pour atteindre ses objectifs,
- Objectif : performance que le centre de décision doit atteindre,
- Règle : procédure qui régit la prise de décision,
- Critère : fonction à optimiser permettant de choisir parmi les variables de décision,
- Contrainte : information qui restreint le champ de la prise de décision en agissant sur les variables de décision.

## 2.3 Les opérateurs logiques

Les opérateurs logiques permettent la combinaison de plusieurs supports en entrée ou en sortie des activités et sont de deux types :

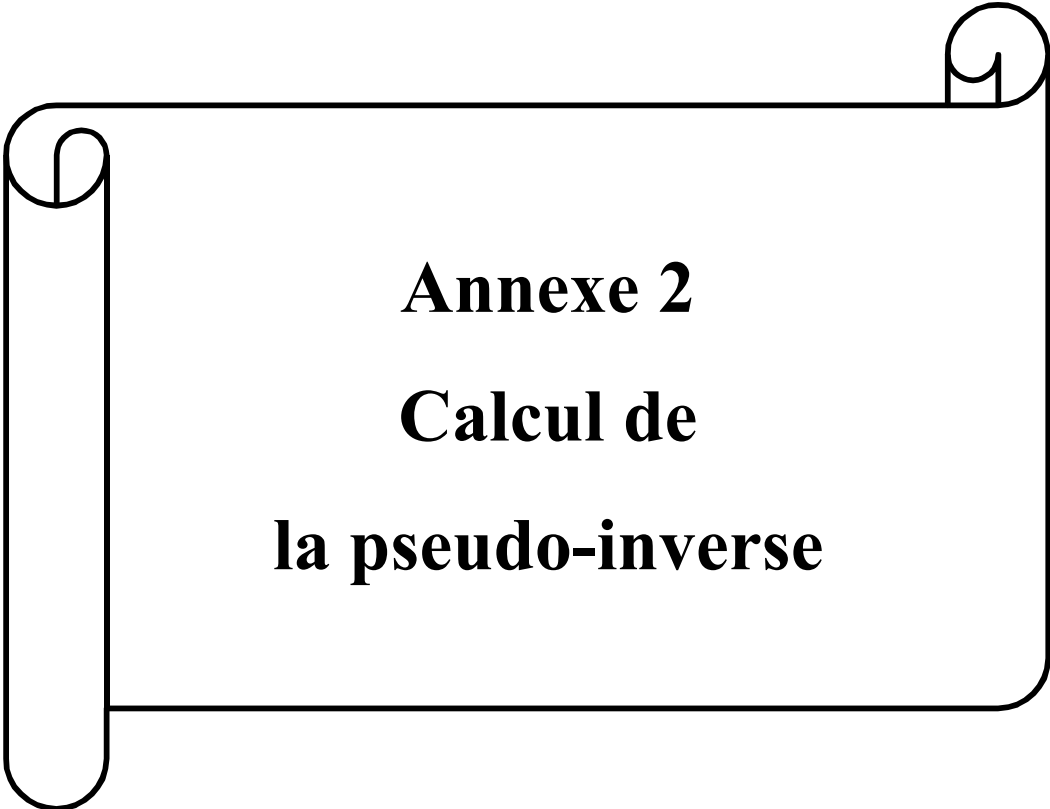
- ET, représenté par une double barre,
- OU, représenté par une simple barre.

## 2.4 Les symboles de communication

Les symboles de communication permettent de signaler qu'un support d'informations dessiné dans le réseau d'un centre de décision provient d'un autre centre de décision (où il est également dessiné) ou qu'il y est envoyé. Ainsi, dans les deux réseaux, les symboles de communication illustrent cet échange d'informations. Ils sont représentés sous forme de losange et mentionnent le code de l'activité et du réseau destinataire ou origine.

ooo





**Annexe 2**  
**Calcul de**  
**la pseudo-inverse**





## La méthode de la pseudo inverse

D'après [ Dombre, 1989]

### 1 PROBLEME POSE

Soit le système linéaire de  $m$  équations à  $n$  inconnues suivant :

$$Y = AX \quad (A2.1)$$

où  $A$  est une matrice connue ( $\dim A = m \times n$ ),  $X$  est un vecteur d'inconnues ( $\dim X = n \times 1$ ) et  $Y$  est un vecteur connu ( $\dim Y = m \times 1$ )

Soit  $W$  la matrice augmentée définie par :

$$W = [J \ X]$$

Soient  $r_w$  et  $r_j$  les rangs respectifs des matrices  $W$  et  $J$ , la relation entre  $r_w$  et  $r_j$  permet de discuter les conditions d'existence des solutions

- si  $r_w \neq r_j$ , le système (A.21) n'est pas compatible,
- si  $r_w = r_j$ , le système (A.21) a au moins une solution
- unique si  $r_w = r_j = n$
- infinie si  $r_w = r_j$  et  $r_w < n$  et  $r_j < n$

### 2 METHODE DE RESOLUTION BASEE SUR LA NOTION DE LA PSEUDO-INVERSE

#### 2.1 Modèle inverse

L'équation (A2.1) a pour solution générale :

$$X = A^+Y + (I - A^+A)Z \quad (A2.2)$$

où  $Z$  est un vecteur arbitraire,  $A^+$  est la pseudo-inverse de  $A$  ( $A^+$  existe toujours et est unique)

- le premier terme  $A^+Y$  constitue la solution générale,
- le second terme  $(I - A^+A)Z$  est la solution homogène.

#### 2.2 Propriétés de la pseudo-inverse $A^+$

$A^+$  vérifie les quatre propriétés suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} A^+AA^+ = A, \\ AA^+A = A^+, \\ AA^+ \text{ est symétrique} \\ A^+A \text{ est symétrique} \end{array} \right. \quad (A2.3)$$

### 2.3 Méthode de calcul de la pseudo-inverse

Il existe différentes méthodes pour le calcul de la pseudo-inverse. Nous présentons ici la méthode de GORLA [GORLA, 1984]. Cette méthode nécessite le calcul explicite du rang de la matrice A.

Si la matrice A est de plein rang : (rangA = min(m,n)), la pseudo-inverse A<sup>+</sup> est calculée de la façon suivante :

$$- \text{ si } m > n \text{ alors } A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \quad (A2.4)$$

$$- \text{ si } m < n \text{ alors } A^+ = A^T (A A^T)^{-1} \quad (A2.5)$$

$$- \text{ si } m = n \text{ alors } A^+ = A^{-1} \quad (A2.6)$$

Si A n'a pas plein rang : (rangA < min(m,n)), on partitionne la matrice A de la façon suivante :

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \text{ avec } \text{rang}(A_{11}) = \text{rang} A \quad (A2.7)$$

Posant A<sub>1</sub> =  $\begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{21} \end{pmatrix}$  et A<sub>2</sub> = (A<sub>11</sub> A<sub>12</sub>), on a A<sup>+</sup> = A<sub>2</sub><sup>T</sup> (A<sub>1</sub><sup>T</sup> A A<sub>2</sub><sup>T</sup>)<sup>-1</sup> A<sub>1</sub><sup>T</sup>

- si le système est compatible, la solution X = A<sup>+</sup>Y + (I - A<sup>+</sup>A)Z est exacte (lieu des solutions). En particulier X(Z = 0) = A<sup>+</sup>Y, est la solution qui minimise ||X||<sup>2</sup> = X<sup>T</sup>X = x<sub>1</sub><sup>2</sup> + x<sub>2</sub><sup>2</sup> + ... + x<sub>n</sub><sup>2</sup>
- si le système n'est pas compatible (pas de solution), on a une solution approchée par X = A<sup>+</sup>Y qui minimise l'erreur ||AX - Y||<sup>2</sup>.

### 3 APPLICATION AU CALCUL DES BESOINS

Si C est la matrice d'incidence du graphe de processus généralisé, tout travail W engendre une variation de matière ΔS = CW W ∈ ℝ<sup>n</sup> ΔS ∈ ℝ<sup>m</sup>

Pour les calculs de besoins, faisons la part des données cibles et des données libres :

$$\Delta S = \begin{pmatrix} \Delta S \\ \Delta S \end{pmatrix} \text{ avec } \begin{matrix} \Delta S \\ \Delta S \end{matrix} \begin{matrix} \text{variation de stocks ciblée suite à des consignes de régulation de stock,} \\ \text{variation de stocks libre.} \end{matrix}$$

Cette partition conduit à reconditionner la matrice C

$$\Delta S = \begin{pmatrix} \Delta S \\ \Delta S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{C} \\ C \end{pmatrix} W \quad (A2.8)$$

L'équation (A.28) conduit à la solution suivante pour la détermination des travaux :

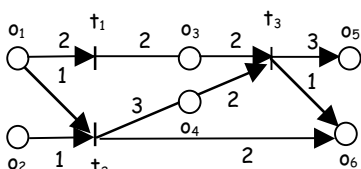
$$\Delta S = \hat{C}W \Rightarrow W = \hat{C}^+ \Delta S + (I - \hat{C}^+ \hat{C})Z \text{ lieu iso-} \Delta S \quad (A2.9)$$

Calcul des besoins en matière

$$\Delta S = \hat{C}W \Rightarrow \Delta S = \hat{C}W = \hat{C} \hat{C}^+ \Delta S + \hat{C} (I - \hat{C}^+ \hat{C})Z \quad (A2.10)$$

### 4 EXEMPLE 1 CAS m>n

Soit le processus de production généralisé représenté par la Figure (A2.1) et la cible de production ΔS = (δa δb 0 δd 48 δf)<sup>T</sup>



$$C = \begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \\ 0 & 3 & -2 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \Delta S = \begin{pmatrix} 0 \\ 48 \end{pmatrix}, \Delta S = \begin{pmatrix} \delta a \\ \delta b \\ \delta d \\ \delta f \end{pmatrix}$$

Figure A2.1 - Processus de production généralisé

Comme  $\hat{c} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$  a plein rang et  $m > n$ , d'après (A2.4),

$$\hat{c}^+ = \hat{c}^T (\hat{c}\hat{c}^T)^{-1} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \\ -2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 8 & -6 \\ -6 & 9 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

D'après (A2.9), la charge de travail est donc :

$$W = \hat{c}^+ \Delta S + (I - \hat{c}^+ \hat{c}) Z \text{ avec } Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}$$

soit  $W(Z) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 48 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} Z = \begin{bmatrix} 16 \\ Z_2 \\ 16 \end{bmatrix}$  avec  $Z_2$  entier car  $Z_2 = W_2$

D'après (A2.10), les besoins en matière sont :

$$\Delta S = \hat{c} W = \begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 16 \\ Z_2 \\ 16 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -32 - Z_2 \\ -Z_2 \\ 3Z_2 - 32 \\ 2Z_2 + 16 \end{pmatrix}$$

Parmi ces modes opératoires, la solution  $W(Z = 0) = \hat{c}^+ \Delta S = \begin{pmatrix} 16 \\ 0 \\ 16 \end{pmatrix}$  minimise  $\|W\|_2 = 512$

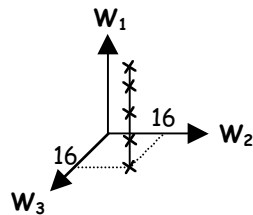


Figure A2.2 - Charge de travail

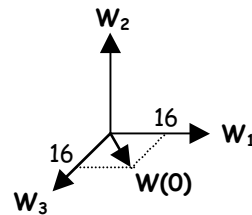
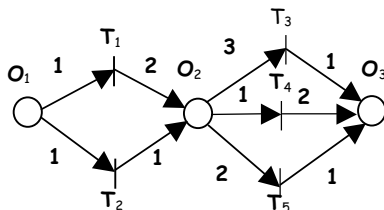


Figure A2.3 - Charge de travail minimale

### 5 EXEMPLE 2 CAS $m < n$

Soit le processus de production généralisé représenté par la Figure (A2.4) et la cible de production  $\Delta S = [\delta a \ \delta b \ 300]^T$



$$c = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & -3 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Figure A2.4 - Processus de production généralisé

Il en résulte  $\hat{c} = (0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1)$ ,  $\hat{c}$  est de plein rang avec  $m < n$ , soit d'après (A2.5)  $\hat{c}^+ = \hat{c}^T (\hat{c}\hat{c}^T)^{-1}$

D'après (A2.9), la charge de travail est donc :

$$W(Z) = \frac{1}{6} (0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1)^T 300 + (I - \hat{c}^+ \hat{c}) Z$$

$$\text{d'où, } \mathbf{W}(\mathbf{Z}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 50 & 100 & 50 \end{pmatrix}^T - 5\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} -5z_1 \\ -5z_2 \\ 50 - 5z_3 \\ 100 - 5z_4 \\ 50 - 5z_5 \end{pmatrix} \quad \text{lieu iso-}\Delta S$$

avec  $z_1 < 0$ ,  $z_2 < 0$ ,  $z_3 < 10$ ,  $z_4 < 20$ ,  $z_5 < 10$

D'après (A2.10), les besoins en matière sont :

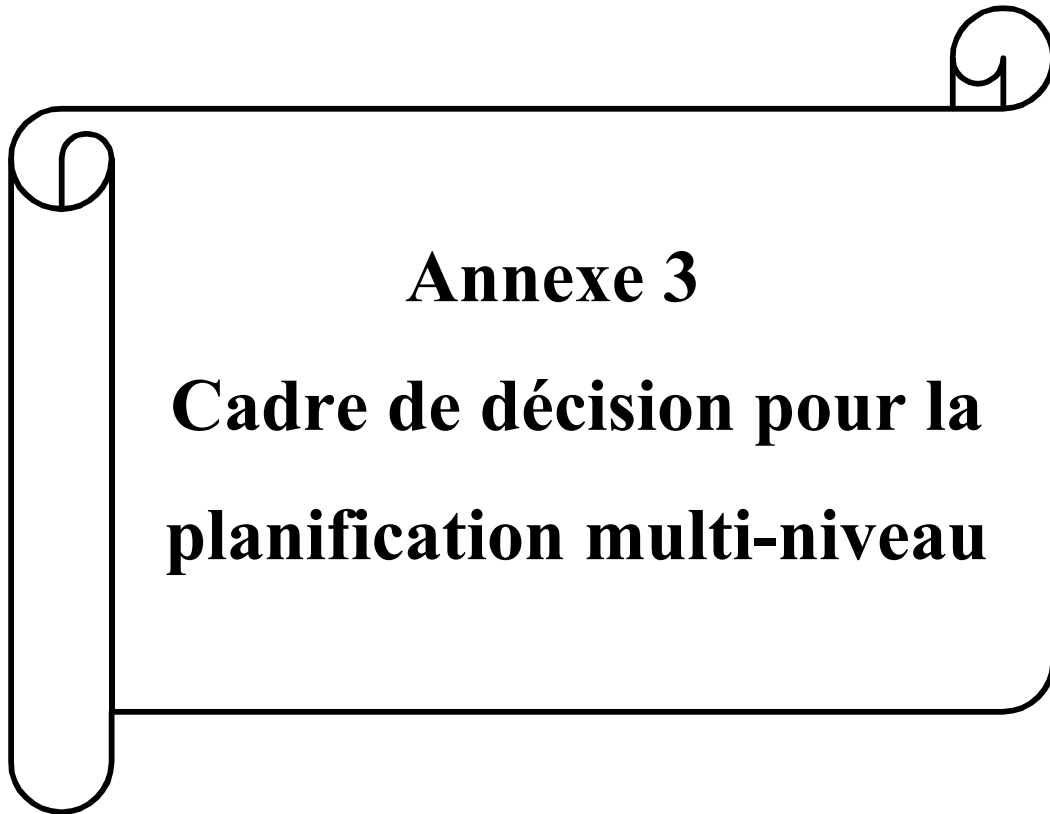
$$\Delta S = \mathbf{C}\mathbf{W}(\mathbf{Z}) = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & -3 & -1 & -2 \end{pmatrix} \mathbf{W} \text{ soit}$$

$$\begin{pmatrix} \delta a \\ \delta b \end{pmatrix} = \Delta S = \begin{pmatrix} 5(z_1 + z_2) \\ 5(-2z_1 - 2z_2 + 3z_3 + z_4 + 2z_5 - 70) \end{pmatrix}$$

Si on choisit le travail économique  $\mathbf{W}(\mathbf{0})$ , les besoins matières sont :

$$\Delta S(\mathbf{W}(\mathbf{0})) = \begin{pmatrix} 0 \\ -350 \end{pmatrix}, \quad (\text{on tire alors uniquement sur le stock d'en-cours}).$$

ooo



---

## Cadre de décision pour la planification multi-niveau Exemple récapitulatif

Il s'agit d'illustrer l'utilisation du modèle de données dans une démarche de planification multi-niveau et répartie grâce à un exemple de complexité volontairement limitée.

Nous considérons dans cet exemple deux niveaux  $v$  et  $v-1$ . Au niveau  $v$ , la ressource entreprise  $(r,v)$  doit, après réception de son carnet de commande, effectuer un calcul besoin/charge puis organiser l'exécution des travaux dont elle a la charge sur ses ressources internes et/ou externes. Nous pourrions alors vérifier la cohérence de la planification du site de production  $(r,v)$  vis-à-vis des ressources à disposition.

L'environnement du centre de conduite  $(r,v)$  est constitué de deux clients  $(1,v)$ ,  $(2,v)$ , d'un fournisseur  $(3,v)$ , de deux preneurs d'ordres hiérarchiques (ressources internes  $(1,v-1)$ ,  $(2,v-1)$ ) et d'un sous-traitant  $(4,v)$ . (Figure A3.1).

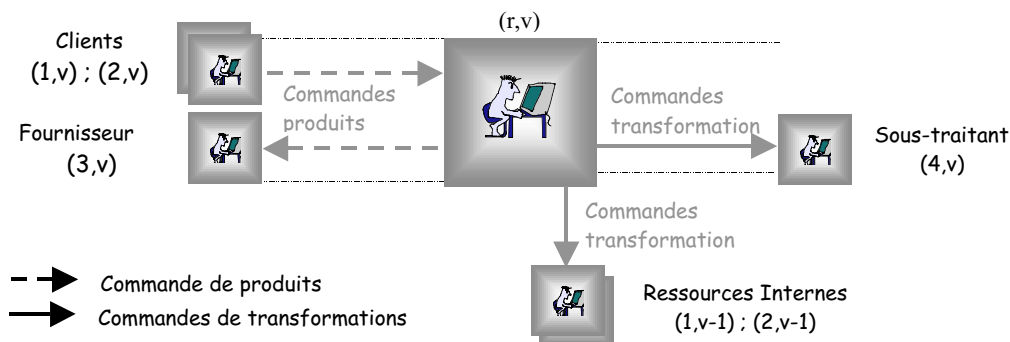


Figure A3.1 - Environnement du centre de conduite  $(r,v)$

### Données statiques

Les horizons et périodes associés à chaque niveau sont respectivement :

- $H^v = 4$  mois,  $h^v = 1$  mois ; soit  $K^v = 4$
- $H^{v-1} = 1$  mois,  $h^{v-1} = 1$  semaine; soit  $K^{v-1} = 4$

Le processus généralisé de production du site  $(r,v)$  est donné (Figure A3.3).

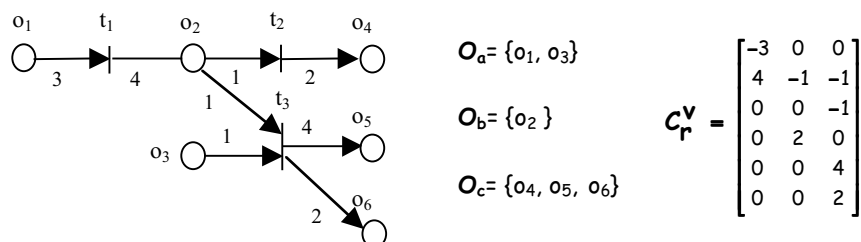


Figure A3.2 - Processus généralisé du site  $(r,v)$

### Commandes clients

Les carnets de commandes reçus par (r,v) sont respectivement :

- $P_{r,1}^{v,v} = [0 \ 0 \ 0 \ 15 \ 0 \ 0]$ ; carnet de commande du client (1,v) à livrer pour le 15 du 4eme mois
- $P_{r,2}^{v,v} = [0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 35 \ 0]$ ; carnet de commande du client (2,v) à livrer avant la fin du 4eme mois.

## 1 PROCESSUS DECISIONNEL de (r,v)

### 1.1 Objectifs de production

#### Groupage des commandes

Supposant les délais d'expédition inférieurs à la durée d'une période, compte tenu des horizons et périodes de son niveau, (r,v) devra, pour respecter son carnet de commande, terminer la fabrication des objets demandés pour la fin de la deuxième période (Figure A3.2).

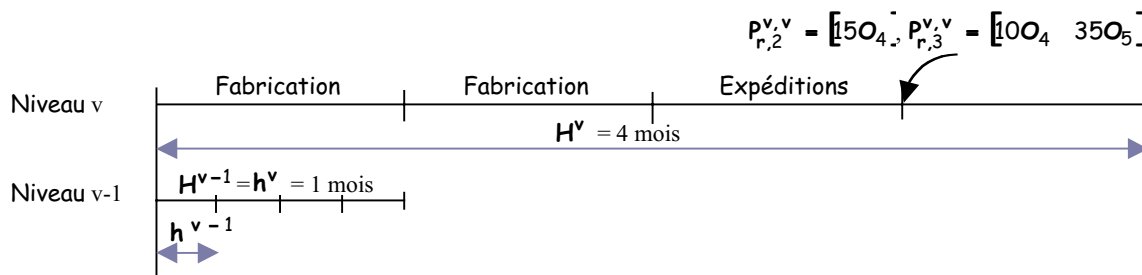


Figure A3.2 - Carnet de commandes échéancées de (r,v)

Après groupement des différents carnets de commandes, la cible de production de (r,v) est :

$$P_r^v(H^v) = [\Delta S_4 \ \Delta S_5] = [25 \ 35]$$

#### Politique de gestion des stocks

Une stratégie de gestion conduit (r,v) à puiser au maximum les quantités d'objets nécessaires à la réalisation de son carnet de commande dans ses stocks.

Soient  $S_r^v(1) = [12 \ 10 \ 10 \ 17 \ 17 \ 2]$  et  $\underline{s}_r^v = [3 \ 2 \ 7 \ 2 \ 2 \ 2]$  les niveaux initiaux et planchers des stocks. (r,v) décide donc de prélever dans ses stocks 15  $O_4$  et 15  $O_5$ . La cible de production est donc :

$$\Delta S_r^v = [\Delta S_4 \ \Delta S_5] = [10 \ 20]$$

La cible de production consiste à produire 10 exemplaires du produit  $O_4$  et 20 exemplaires du produit  $O_5$ . La production d'objets  $O_6$  n'est pas imposée et il n'y a aucune condition quant à la variation du stock d'en-cours  $\Delta S_2$ .

Remarque : il serait possible d'intégrer des politiques de régulation des stocks relatives à ces objets dans la cible de production.

### 1.2 Calcul besoin/charge

Le modèle de processus associé au niveau v est  $\Delta S_r^v = C_r^v W_r^v$ .

$$\Delta S_r^v = [\Delta S_4 \ \Delta S_5] = [10 \ 20] \quad \Delta S_r^v = [\Delta S_1 \ \Delta S_2 \ \Delta S_3 \ \Delta S_6]$$

La matrice  $C_r^v$  est donc partitionnée comme suit :

$$C_r^v = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \hat{C}_r^v = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$m = 2, \ n = 3 \text{ et } \text{rang } \hat{C} = 2 \text{ donc } \text{rang } \hat{C} = m \text{ et } \text{rang } \hat{C} < n$$



Il n'y a aucune condition de compatibilité, la solution est exacte multiple, d'ordre de multiplicité 1.

En utilisant la relation (A2.7) pour le calcul de la pseudo-inverse  $\hat{c}$  (cf. annexe 2), les relations (4.6) et (4.7) pour le calcul de la charge (respectivement des besoins), on obtient :

$$\hat{c}_r^v = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.5 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{bmatrix}, \quad W_r^v(Z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.5 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix}$$

$$\Delta S_r^v(Z) = \hat{c}W(Z) = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3Z_1 \\ 4Z_1 - 10 \\ -5 \\ 10 \end{bmatrix}$$

Les solutions  $W_r^v(Z)$  et  $\Delta S_r^v(Z)$  sont donc fonction du seul paramètre  $Z_1$  et sont soumises à un certain nombre de contraintes :

- Contrainte logique (4.3)  $W_r^v(Z) \in \mathbb{N}^3 \Rightarrow Z \in \mathbb{N}^3$
- Contrainte logique (4.4)  $\Delta S_1 < 0, \Delta S_3 < 0, \Delta S_4 > 0, \Delta S_5 > 0, \Delta S_6 > 0$
- Contrainte physique (4.5)  $\Delta S < \Delta S < \Delta S$

On en déduit les valeurs possibles du paramètre  $Z_1$ ,  $Z_1 \in \{1; 2; 3\}$ . Ce faisant, on obtient la table A3.1. Cette table donne l'ensemble des scénarios de production répondant à la cible demandée. Les solutions  $W_r^v = [W_1 \ W_2 \ W_3]$  sont au nombre de trois, discriminées par la valeur du scalaire  $Z_1$ .

			$Z_1 = 1$	$Z_1 = 2$	$Z_1 = 3$		
Cible	$\Delta S_r^v(Z)$	$O_4$	$\Delta S_4$	10	10	10	
		$O_5$	$\Delta S_5$	20	20	20	
Stocks libres	$\Delta S_r^v(Z)$	$O_1$	$\Delta S_1$	-3	-6	-9	composant
		$O_2$	$\Delta S_2$	-6	-2	2	
		$O_3$	$\Delta S_3$	-5	-5	-5	composant
		$O_6$	$\Delta S_6$	10	10	10	
Charge	$W_r^v(Z)$	$T_1$	$w_1$	1	2	3	
		$T_2$	$w_2$	5	5	5	
		$T_3$	$w_3$	5	5	5	

Table A3.1 - Solutions du calcul de besoin et de charge pour atteindre la cible  $\Delta S_r^v$

En fonction de critères qui lui sont propres (coût économique, disponibilité des ressources, équilibrage de charge, etc.), le centre de conduite fait son choix parmi les solutions admissibles. Choisissons par exemple la solution  $Z_1 = 3$  qui produit de l'en-cours en objets de référence  $O_2$  :

$$W_r^v(Z_1 = 3) = [3 \ 5 \ 5]^T, \quad \Delta S_r^v(Z_1 = 3) = [-9 \ 2 \ -5 \ 10 \ 20 \ 10]^T$$

Les besoins en composants sont donc de  $9O_1$  et de  $5O_3$ . Considérant les niveaux initiaux et planchers des stocks, on voit que le stock final  $S_r^v = [3 \ 12 \ 5 \ 27 \ 37 \ 12]^T$  viole la contrainte plancher  $\underline{S}_r^v$ . Il est donc nécessaire de s'approvisionner en objets de type  $O_3$ . On convient de commander ces objets chez le fournisseur (3,v).

### 1.3 Logistique externe

#### Scénario de logistique externe

Soient le scénario de la logistique externe et les capacités des voies de transports (supposées fournies par un tableau de bord) présentés Table A.3.2, Table A.3.3. Il est alors possible de déterminer les délais

d'approvisionnements et d'expéditions entre le site (r,v) et ses fournisseurs, ses clients et respectivement ses sous-traitants (5.10).

	k = 1	k = 2	k = 3
(1,v)			
(2,v)			Exp <sub>1,r</sub> <sup>v,v</sup> (3)
(3,v)	App <sub>r,3</sub> <sup>v,v</sup> (1)		Exp <sub>2,r</sub> <sup>v,v</sup> (3)
(r,v)			

Table A3.2 - Logistique externe de (r,v)

La ressource (4,v) étant une ressource sous-traitante, il est nécessaire de l'approvisionner en objets

Scénario logistique (choisi)	Capacité des voies de transport (donné)	Délais de transport (calculé)
Exp <sub>1,r</sub> <sup>v,v</sup> (3) = [0 0 0 15 0 0]	$\tilde{\Omega}^{-1}_{1,r}{}^{v,v}(3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/30 \\ 1/15 \\ 1/4 \end{bmatrix}$	$d_{1,r}^{v,v}(3) = h_r^v \text{Exp}_{1,r}^{v,vT}(3) \tilde{\Omega}^{-1}_{1,r}{}^{v,v}(3)$ $= h_r^v [0 \ 0 \ 0 \ 15 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/30 \\ 1/15 \\ 1/4 \end{bmatrix} = \frac{h_r^v}{2}$
Exp <sub>2,r</sub> <sup>v,v</sup> (3) = [0 0 0 10 35 0]	$\tilde{\Omega}^{-1}_{2,r}{}^{v,v}(3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/25 \\ 1/100 \\ 1/10 \end{bmatrix}$	$d_{2,r}^{v,v}(3) = h_r^v \text{Exp}_{2,r}^{v,vT}(3) \tilde{\Omega}^{-1}_{2,r}{}^{v,v}(3)$ $= h_r^v [0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 35 \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/25 \\ 1/100 \\ 1/10 \end{bmatrix} = \frac{3h_r^v}{4}$
App <sub>r,3</sub> <sup>v,v</sup> (1) = [0 0 2 0 0 0]	$\tilde{\Omega}^{-1}_{r,3}{}^{v,v}(1) = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$d_{r,3}^{v,v}(1) = h_r^v \text{App}_{r,3}^{v,vT}(1) \tilde{\Omega}^{-1}_{r,3}{}^{v,v}(1)$ $= h_r^v [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = h_r^v$
Exp <sub>4,r</sub> <sup>v,v</sup> (1) = [0 0 2 0 0 0]	$\tilde{\Omega}^{-1}_{4,r}{}^{v,v}(1) = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$d_{4,r}^{v,v}(1) = h_r^v \text{Exp}_{4,r}^{v,vT}(1) \tilde{\Omega}^{-1}_{4,r}{}^{v,v}(1)$ $= h_r^v [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2h_r^v}{5}$

Table A3.3 - Tableau de bord de la logistique externe à (r,v)

Considérant, d'une part, les délais d'expéditions de (r,v) à (1,v) et de (r,v) à (2,v) et d'autre part, les échéances des carnets de commande, la charge  $W_r^v = [3 \ 5 \ 5]$  ne peut être allouée sur les ressources accessibles (4,v), (1,v-1) et (2,v-1) que sur les deux premières périodes  $k_r^v = \{ 2 \}$ .

Remarque : le respect de la contrainte de capacité des ressources de transport est garanti par le fait que pour chaque voie de transport le délai est inférieur à la durée de la période  $h_r^v$ .

#### 1.4 Allocation de charge

Les ressources sont cumulatives. Leur disponibilité, ici présentée Table A.3.4, est supposée fournie par un tableau de bord. Soit le scénario d'allocation  $\hat{W}_1^{v,v-1}(k), \hat{W}_2^{v,v-1}(k), \hat{W}_4^{v,v}(k), k_r^v = \{ 2 \}$ , produit par un algorithme sur lequel nous ne prenons pas parti, défini Table A3.4.

		k = 1	k = 2	k = 3
(4,v) (sous-traitant)		$S_4^v(1)$	$S_4^v(1) = S_4^v(2)$	$S_4^v(2)$
	capacit	$\tilde{W}_4^{v-1}(1) = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix}$	$\tilde{W}_4^{v-1}(2) = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 1/9 \\ 1/6 \end{bmatrix}$	
	charge	$\hat{W}_4^v(1) = [0 \ 0 \ 2]$	$\hat{W}_4^v(2) = [0 \ 0 \ 0]$	
(1,v-1) (ressource interne)		$S_1^{v,v-1}(1)$	$S_1^{v,v-1}(1) = S_1^{v,v-1}(2)$	$S_1^{v,v-1}(2)$
	capacit	$\tilde{W}_1^{v,v-1}(1) = \begin{bmatrix} 1/4 \\ 1/4 \\ 1/2 \end{bmatrix}$	$\tilde{W}_1^{v,v-1}(2) = \begin{bmatrix} 1/4 \\ 1/3 \\ 1/4 \end{bmatrix}$	
	charge	$\hat{W}_1^{v,v-1}(1) = [3 \ 0 \ 0]$	$\hat{W}_1^{v,v-1}(2) = [0 \ 2 \ 1]$	
(2,v-1) (ressource interne)		$S_2^{v,v-1}(1)$	$S_2^{v,v-1}(1) = S_2^{v,v-1}(2)$	$S_2^{v,v-1}(2)$
	capacit	$\tilde{W}_2^{v,v-1}(1) = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/4 \\ 1/2 \end{bmatrix}$	$\tilde{W}_2^{v,v-1}(2) = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 1/9 \\ 1/6 \end{bmatrix}$	
	charge	$\hat{W}_2^{v,v-1}(1) = [0 \ 1 \ 1]$	$\hat{W}_2^{v,v-1}(2) = [0 \ 2 \ 1]$	

Table A3.4 - Allocation de charge

Les quantités initiales d'objets  $O_2$  et  $O_3$  disponibles en stock étant supérieures aux valeurs planchers, il est possible de réaliser un certain nombre de transformations de type  $t_2$  et  $t_3$  dans la première période  $k = 1$ .

Quel que soit l'algorithme d'allocation utilisé, on vérifie que le scénario d'allocation proposé Table A3.4 vérifie les règles de cohérence proposées au chapitre 5. Les règles de cohérence à vérifier concernent la couverture des travaux, les précédences entre travaux affectés, le respect des capacités des ressources de transformation.

#### Couverture des travaux

$$W_r^v(H^v) = \hat{W}_1^{v,v-1}(1) + \hat{W}_1^{v,v-1}(2) + \hat{W}_2^{v,v-1}(1) + \hat{W}_2^{v,v-1}(2) + \hat{W}_4^{v,v}(1) + \hat{W}_4^{v,v}(2) \quad (5.15)$$

$$W_r^v(H^v) = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix} \quad \text{CQFD}$$

Précédences entre paquets de travaux affectés

$$\sum_{k=1}^K CW(k) = S'(K) - S(1) \quad (5.16)$$

$$W^{v,v-1}(1) = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad W^{v,v}(1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad W^{v,v-1}(2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad W^{v,v}(2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_r^v [W^{v,v-1}(1) + W^{v,v}(1) + W^{v,v-1}(2) + W^{v,v}(2)] = [-9 \ 2 \ -5 \ 10 \ 20 \ 10]^T = \Delta S_r^v \quad \text{CQFD}$$

Capacité des ressources de transformation

Les ressources de transformation sont à charges couplées

$$W^T \tilde{W}^{-1}(k) \leq 1$$

ressource (4,v)  $W_4^{v,vT}(1)\tilde{W}_4^{v,v-1}(1) = 0.5 \leq 1, \quad W_4^{v,vT}(2)\tilde{W}_4^{v,v-1}(2) = 0 \leq 1 \quad \text{CQFD}$

ressource (1,v-1)  $W_1^{v,v-1T}(1)\tilde{W}_1^{v,v-1-1}(1) = 0.75 \leq 1, \quad W_1^{v,v-1T}(2)\tilde{W}_1^{v,v-1-1}(2) = 11/12 \leq 1 \quad \text{CQFD}$

ressource (2,v-1)  $W_2^{v,v-1T}(1)\tilde{W}_2^{v,v-1-1}(1) = 0.75 \leq 1, \quad W_1^{v,v-1T}(2)\tilde{W}_1^{v,v-1-1}(2) = 7/18 \leq 1 \quad \text{CQFD}$

Ces valeurs représentent les taux de charge des ateliers par période.

### 1.5 Logistique associée à la réalisation des transformations

Le stock global de (r,v) est virtuel. C'est une vue abstraite des stocks répartis dans les ressources internes. Il n'y a donc pas de temps de transport entre la zone de stockage de (r,v) et celles de ses filles (1,v-1) et (2,v-1). Ce faisant, l'approvisionnement en composants de type  $O_3$  nécessaires à la réalisation par (1,v-1) et (2,v-1) de la transformation  $t_3$  est traité par la logistique externe.

Soit le scénario logistique (Table A.3.6) associée à la réalisation des transformations. Les capacités et délais de transport associés à la logistique interne sont présentés Table A.3.5.

Scénario logistique (choisi)	Capacité des voies de transport (donnée)	Délais de transport (calculé)
$\text{Exp}_{2,1}^{v-1,v-1}(2) = [0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$	$\tilde{\Omega}_{2,1}^{v-1,v-1-1}(2) = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/8 \\ 1/4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$d_{2,1}^{v-1,v-1}(2) = h_r^v \text{Exp}_{2,1}^{v-1,v-1T}(2) \tilde{\Omega}_{2,1}^{-1v-1,v-1}(2)$ $= h_r^v [0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/8 \\ 1/4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{h_r^v}{8}$

Table A3.6 - Tableau de bord de la logistique interne

	k = 1	k = 2	k = 3
(4,v)			
(1,v-1)		Exp <sub>2,1</sub> <sup>v-1,v-1</sup> (2)	
(2,v-1)			

Table A3.5 - Logistique associée à la réalisation des transformations

On vérifie comme précédemment le respect des contraintes de capacité des voies de transport.

Remarque : la ressource (4,v) est une ressource sous-traitante de la ressource(r,v). Ce faisant (r,v) doit lui fournir les composants nécessaires à la réalisation de la transformation sous-traité. Par suite, (4,v) doit renvoyer les objets transformés. La sous-traitance nécessite donc d'étendre le réseau logistique précédent (Table A.3.7, Table A.3.8).

	k = 1	k = 2	k = 3
(r,v)			
(4,v)	Exp <sub>4,v</sub> <sup>v,v</sup> (1)	App <sub>r,4</sub> <sup>v,v</sup> (2)	

Table A3.7 - Logistique externe de (r,v)

$$\begin{aligned}
 \text{Exp}_{4,r}^{v,v}(1) &= [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 \tilde{\Omega}_{4,r}^{-1v,v}(1) &= \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 d_{4,r}^{v,v}(1) &= h_r^v \text{Exp}_{4,r}^{v,vT}(1) \tilde{\Omega}_{4,r}^{-1v,v}(1) \\
 &= h_r^v [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2h_r^v}{5} \\
 \\
 \text{Exp}_{r,4}^{v,v}(2) &= [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 \tilde{\Omega}_{r,4}^{-1v,v}(2) &= \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 d_{r,4}^{v,v}(2) &= h_r^v \text{Exp}_{r,4}^{v,vT}(2) \tilde{\Omega}_{r,4}^{-1v,v}(2) \\
 &= h_r^v [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/3 \\ 0 \\ 1/4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{h_r^v}{2}
 \end{aligned}$$

Table A3.8 - Tableau de bord de la logistique externe à (r,v)

### 1.6 Conclusion

Compte tenu des délais de fabrication, approvisionnement et expédition des objets et compte tenu des scénarios proposés, la faisabilité du carnet de commandes de la ressource (r,v), ainsi que les contraintes de stock minimal et maximal en début, respectivement fin de période, ont été vérifiées.

L'allocation de charge réalisée par (r,v) sur ses ressources internes revient pour (r,v) à spécifier à chacune d'elles un carnet de commande libellé en termes de transformations à réaliser.

## 2 DESAGREGATION DES PROCESSUS DU NIVEAU V AU NIVEAU V-1

Les travaux alloués aux ressources filles de  $(r,v)$  constituent, pour le centre de conduite pilotant chacun d'eux, des plans de charge agrégés sur l'horizon  $h^v = H^{v-1}$ . Leur mise en œuvre peut nécessiter à nouveau une désagrégation des données techniques (processus et ressources) locales, ce que nous illustrons ici. Les centres de conduite gérant les ressources  $(1,v-1)$  et  $(2,v-1)$  disposent d'une représentation locale fine du processus les concernant (Figure A3.3), sous la forme de matrices  $C_1^{v-1}$  et  $C_2^{v-1}$ .

On rappelle que sur  $k = 1$ ,  $(1,v-1)$  doit réaliser  $W_1^{v,v-1}(1) = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \end{bmatrix}$  et  $(2,v-1)$  doit réaliser  $W_2^{v,v-1}(1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ .

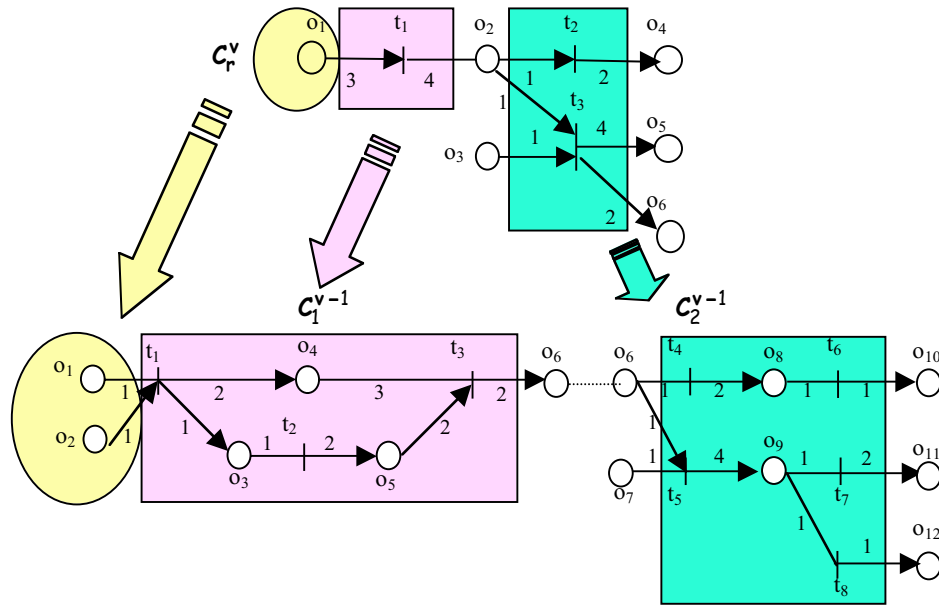


Figure A3.3 - Désagrégation de processus

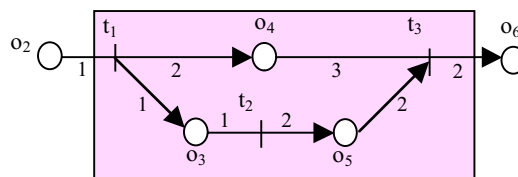
### 2.1 Données statiques associées aux ressources internes de $(r,v)$

ressource

Processus de transformation généralisé

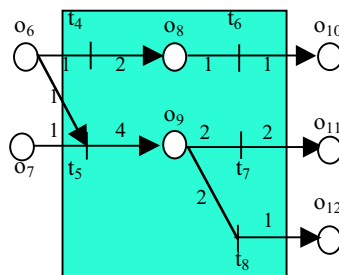
Données techniques associées

$(1,v-1)$



$$C_1^{v-1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & -3 \\ 0 & 2 & -3 \\ 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

$(2,v-1)$



$$C_2^{v-1} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure A3.4 - Processus locaux

## 2.2 Désagrégation des transformations

Toute transformation de niveau  $v$  est désagrégée en un processus de niveau  $v-1$ , engendrant de nouvelles transformations. Les travaux désagrégés sont proportionnels aux travaux agrégés dont ils dérivent.

D'après la figure A.3.3, la matrice de désagrégation des transformations entre les niveaux  $v$  et  $v-1$  vaut :

$$N_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

## 2.3 Désagrégation des objets

$\overline{O}_r^{v,v-1} = \{O_1^{v-1}, O_2^{v-1}, O_6^{v-1}, O_7^{v-1}, O_{10}^{v-1}, O_{11}^{v-1}, O_{12}^{v-1}\}$  est la nomenclature des objets de niveau  $v-1$  dérivée de la nomenclature des objets de niveau  $v$ , et  $\underline{O}_r^{v,v-1} = \{O_3^{v-1}, O_4^{v-1}, O_5^{v-1}, O_8^{v-1}, O_9^{v-1}\}$  la nomenclature des objets de niveau  $v-1$  introduits par désagrégation des transformations de niveau  $v$  (Figure A3.3).

Dans cet exemple, la désagrégation des objets a été définie comme suit :

- un objet de type  $O_1^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_1^{v-1}$  et 1 objet de type  $O_2^{v-1}$
- un objet de type  $O_2^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_6^{v-1}$
- un objet de type  $O_3^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_7^{v-1}$
- un objet de type  $O_4^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_{10}^{v-1}$
- un objet de type  $O_5^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_{11}^{v-1}$
- un objet de type  $O_6^v$  se désagrège en 1 objet de type  $O_{12}^{v-1}$

Le lien de proportionnalité entre les quantités d'objets de la nomenclature  $\overline{O}_r^{v,v-1}$  et ceux de la nomenclature  $O_r^v$  est donc formalisé par :

$$M_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les objets désagrégés constituant la nomenclature  $\overline{O}_r^{v-1,v}$  n'est qu'une partie de la nomenclature  $\overline{O}_r^{v-1}$  des objets de niveau  $v-1$ , défini par :

$$I_r^{v-1,v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2.4 Cohérence inter-niveau

Connaissant  $M_r^{v-1,v}$ ,  $C_r^v$ ,  $I_r^{v-1,v}$ ,  $C_r^{v,v-1}$  et  $N_r^{v-1,v}$ , la cohérence des données locales peut être vérifiée grâce à la propriété (6.9).

$$M_r^{v-1,v} C_r^v = I_r^{v-1,v} C_r^{v,v-1} N_r^{v-1,v}$$

Tous calculs faits, on trouve pour le membre de droite et de gauche respectivement :

$$M_r^{v-1,v} C_r^v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$I_r^{v-1,v} C_r^{v,v-1} N_r^{v-1,v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & -2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3/2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_r^{v-1,v} C_r^{v,v-1} N_r^{v-1,v} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Les données sont donc cohérentes entre les deux niveaux v et v-1.

ooo







---

### Résumé en Français

La globalisation des marchés et les évolutions des technologies de communication et d'information ont fait émerger des organisations de production réticulaires (réseaux d'entreprises). Basées sur des relations étroites de partenariat, celles-ci nécessitent de gérer la chaîne logistique et d'étendre les outils de Gestion de Production traditionnelle à l'échelle du réseau d'entreprises. La planification de la production, fonction clé, demeurant mal résolue, ce mémoire propose un modèle formel de données cadrant la décision experte en planification/ordonnancement multi-site de la production.

Nos développements sont basés sur le concept de conduite généralisée qui traite conjointement et récursivement l'allocation des tâches au fur et à mesure de la désagrégation des plans et des données techniques afférentes (gammes et ressources). Dans cette approche, chaque ressource est pilotée par un centre de conduite générique impliqué dans des relations de partenariat et/ou de supervision, instanciable à tout niveau de la structure de conduite.

Pour tout centre de conduite, on initialise la fonction planification par la donnée d'un carnet de commande. Le processus décisionnel d'un centre se décompose alors en deux phases :

- dans un premier temps, un calcul besoin/charge permettant d'évaluer quantitativement, qualitativement et sémantiquement la charge de travail du centre de conduite,
- dans un second temps, une allocation charge/ressources internes et/ou externes, intégrant les contraintes d'approvisionnement logistique.

Un ensemble de règles permet d'attester, d'une part, de la cohérence du scénario d'allocation proposé et, d'autre part, de la cohérence de la désagrégation et de la répartition des données entre centres de conduite impliqués dans des relations hiérarchiques et/ou de coopération.

---

### Titre en anglais

A formal decision framework for multi-level planning of networked production systems

---

### Résumé en Anglais

The market globalisation and the evolution of information and communication technology have led to the emergence of networked production organisations. Based on closed relationship, these organisations need to manage the supply chain and to extend production management tools to the scale of enterprises networks. As the planning function is not well-ensured, our works consists in the proposition of a formal model to support the expert decision in the context of multi-site production planning and scheduling.

Our development are based on the concept of generalised production control. This concept allows simultaneous and recursive task allocation, according to the plan and incoming technical data desegregation (roots and resources). In this approach, each resource is controlled by a generic decision centre involved in partner and/or supervision relationships, instanciable at each decision level.

For each decision centre, the planning function is initialised by an order book. Then the decisional process of a centre can be split up into two phases :

- in the first time, a requirement/load calculus that permits to evaluate qualitatively, quantitatively and semantically the amount of works that the decision centre has to perform,
- in the second time, a load external and/or internal resource allocation that takes into account the logistic constraints

A set of rules that permit to check the coherency of the proposed allocation scenario and the coherency of the desegregation and repartition of data between decision centres involved in hierarchical and cooperation relation is then proposed.

---

### Discipline

PRODUCTIQUE

---

### Mots-clés

Planification multi-site, entreprises réticulaires, modèle de données, aide à la décision

---

### Laboratoire de rattachement

Laboratoire d'Automatique et de Productique - Groupe de Recherche en Automatisation Intégrée  
UMR CNRS 5131 - Université Bordeaux 1 - 351, Cours de la Libération - 33405 TALENCE CEDEX

---