

N° d'ordre : 3096

THESE

PRESENTEE A

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES
ET DE L'INGENIEUR

Par **Melle Séverine SPERANDIO**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : PRODUCTIQUE

Usage de la modélisation multi-vue d'entreprise pour la conduite des systèmes de production

Soutenue le 15 Décembre 2005

Après avis de : MM. B. GRABOT

Professeur à l'ENIT de Tarbes

C. TAHON

Professeur à l'Université de Valenciennes

Devant la Commission d'examen formée de :

MM. J.P. BOURRIERES

Professeur à l'Université Bordeaux1

D. BREUIL

Directeur de la recherche de l'EIGSI

G. DOUMEINGTS

Professeur Emérite de l'Université Bordeaux1

Président

B. GRABOT

Professeur à l'ENIT de Tarbes

F. PEREYROL

Maître de Conférence à l'Université Bordeaux1

Rapporteur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire d'Automatique, Productique et Signal de l'Université Bordeaux 1, dirigé par Monsieur le Professeur Alain Oustaloup, que je remercie pour son accueil chaleureux.

Que Monsieur Jean-Paul Bourrières, Professeur à l'Université Bordeaux 1 et Directeur de Recherche de l'équipe GRAI, reçoive l'expression de toute ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet de recherche. Sa rigueur, son pragmatisme, ainsi que ses compétences scientifiques m'ont permis de mener à bien cette étude, et ses conseils avisés et judicieux ont toujours été d'une aide très précieuse.

Mes plus sincères remerciements vont à Monsieur Frédéric Pereyrol, Maître de Conférences à l'IUT Qualité Logistique Industrielle et Organisation, qui, en agissant au titre de co-directeur, a participé à l'aboutissement de cette thèse. Ses perpétuels encouragements et sa constante bonne humeur ont ainsi été d'un grand soutien.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Bernard Grabot, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes et membre du Laboratoire Génie de la Production, ainsi que Monsieur Christian Tahon, Professeur à l'Université de Valenciennes et membre du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur Dominique Breuil, Directeur de recherche de l'École d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels de La Rochelle, et le remercie d'avoir examiné ce travail avec tant d'intérêt.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Guy Doumeingts, Professeur Emérite de l'Université Bordeaux 1, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Merci à tous mes collègues et amis du LAPS, qui se reconnaîtront. Merci aussi à tous les membres de l'IUT QLIO d'Agen qui m'ont accueillie les bras ouverts. Qu'ils sachent qu'ils forment une équipe incroyable, et que c'est un réel plaisir de travailler avec eux : Joël (un chef de département comme on les aime), Pascale (merci d'avoir pris soin de moi dans les moments difficiles), Fred (roi des TP Hall !!), Marie-Hélène (merci de me motiver pour l'aquagym !), Fabrice (qui court 100 Km pour le plaisir, si si), Bernard (TOEIC, TOEIC, TOEIC ...), Jean-Christophe, David, Frédéric, Joël et Simon (nos hommes qui tombent à pic), Danielle et Linda (nos miss sourire). Je souhaite remercier également tous mes étudiants qui contribuent plus qu'ils ne le croient à mon bien-être ; bonne route à eux.

Je souhaite enfin remercier mes amis. Gwen, bien sûr, toujours là ; Jjak, le seul capable de faire 100 Km pour m'apporter du chocolat en cas de déprime ; Olivier, éternel Loulou, fournisseur de tulipes blanches ; Lolo, petit teigneux (!!), merci d'être là et de me supporter au quotidien. Une tendre pensée pour Jo et Coca qui ont supporté toutes mes crises d'angoisse et d'égoïsme.

Enfin, merci à mes parents, à qui je dois tout. Je vous aime très fort.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE _____ 10



PARTIE 1: MODELISATION MULTI-VUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____ 14

INTRODUCTION A LA PARTIE 1 : _____ 16

CHAPITRE 1

MODELISATION FONCTIONNELLE ET ORGANIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION : PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART _____ 18

1. INTRODUCTION _____ 21

2. PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE _____ 21

2.1 La chaîne de valeur _____ 21

2.2 Le Supply Chain Management ou Gestion de Chaînes Logistiques _____ 22

2.3 Les réseaux d'entreprise _____ 23

2.4 Conclusion _____ 24

3. MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____ 24

3.1. Principes de modélisation des systèmes de production _____ 24

3.2. Modélisation externe des systèmes de production _____ 26

3.3. Modélisation interne des systèmes de production _____ 26

4. MODELISATION DES SYSTEMES DE PILOTAGE _____ 27

4.1. Définition du système de pilotage _____ 27

4.2. Modélisation fonctionnelle du système de pilotage _____ 28

4.3. Modélisation organique du système de pilotage _____ 33

5. OUTILS ET METHODES POUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE _____ 37

5.1. Modélisation fonctionnelle de l'entreprise _____ 37

5.2.	Modélisation organique de l'entreprise _____	41
5.3.	Approches mixtes _____	44
6.	CONCLUSION _____	51
CHAPITRE 2		
MODELISATION EVOLUTIONNISTE DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____		56
1.	INTRODUCTION _____	58
2.	DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____	58
2.1.	Introduction _____	58
2.2.	Les types comportementaux _____	59
2.3.	Evénements et analyse de criticité _____	61
2.4.	Impact de l'évolution _____	62
2.5.	Pilotage ou gestion de l'évolution _____	62
3.	MODELISATION EVOLUTIONNISTE _____	63
3.1.	Approches génériques pour la gestion de l'évolution des systèmes de production _____	63
3.2.	Méthodes spécifiques de gestion de l'évolution d'un système de production _____	65
3.3.	Cycle de vie du système et du produit _____	69
4.	CONCLUSION _____	74
CHAPITRE 3		
MULTI-MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION : APPLICATION AU SYSTEME DE PILOTAGE _____		76
1.	INTRODUCTION _____	79
2.	REFERENTIEL MULTI-VUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____	79
2.1.	Principes du référentiel multi-vue _____	79
2.2.	Relations entre modèles _____	82
2.3.	Degré d'agrégation du modèle _____	83
3.	APPLICATION A LA MODELISATION DU PILOTAGE DE LA PRODUCTION _____	85

3.1.	Les Modèles de conduite issus du laboratoire _____	86
3.2.	Modèle de données _____	87
3.3.	Modèle de référence tridimensionnel pour le pilotage _____	89
3.4.	Mécanismes d'agrégation du modèle du système de pilotage _____	96
3.5.	Méthodologie d'instanciation des modèles fonctionnel et organique du système de pilotage _____	98
3.6.	Synthèse _____	105
4.	CONCLUSION _____	107
	CONCLUSION DE LA PARTIE 1 _____	108



	PARTIE 2 : DE L'USAGE DES MODELES POUR LA GESTION DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION _____	110
--	--	-----

	INTRODUCTION A LA PARTIE 2 : _____	112
--	------------------------------------	-----

CHAPITRE 4

	LA MODELISATION SUPPORT A LA GESTION DU CYCLE DE VIE DU SYSTEME _____	114
--	--	-----

1.	INTRODUCTION _____	117
----	--------------------	-----

2.	GESTION DU CYCLE DE VIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION BASEE SUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE MULTI-VUE _____	118
----	--	-----

2.1.	Gestion de l'évolution des systèmes de production _____	118
------	---	-----

2.2.	Démarche méthodologique pour la gestion basée-modèle du cycle de vie du système _____	121
------	--	-----

2.3.	Conclusion _____	125
------	------------------	-----




3.	EXPRESSION DE LA PERFORMANCE _____	125
----	------------------------------------	-----

3.1.	Notion d'indicateur de performance _____	125
------	--	-----

3.2.	Systèmes d'indicateurs de performance _____	128
------	---	-----

3.3.	De l'usage des modèles et des indicateurs de performance pour la gestion du cycle de vie	
------	--	--

des systèmes de production	129
4. ANALYSE DE CRITICITE ET GESTION DES EVENEMENTS	133
4.1. Introduction	133
4.2. Evénements de faible amplitude	135
4.3. Evénements d’amplitude moyenne	136
4.4. Evénements de forte amplitude	136
4.5. Conclusion	137
5. LE MODELE GRAI SUPPORT A LA CONDUITE DE L’EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	138
5.1. Introduction	138
5.2. Système de conduite multi-niveau pour l’évolution des systèmes de production	138
5.3. Système de conduite pour la ré-ingénierie des systèmes de production	141
5.4. Synthèse	147
6. CONCLUSION	149
CHAPITRE 5	
LA LOGISTIQUE D’INFORMATION POUR LE PILOTAGE DU CYCLE DE VIE DU SYSTEME DE PRODUCTION	150
1. INTRODUCTION	152
2. LE SYSTEME D’INFORMATION	152
2.1. Définitions	152
2.2. Rôle de l’information vis-à-vis de la décision	154
3. L’INFORMATION DANS LA CONDUITE DE L’EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	156
3.1. Informations dédiées aux niveaux de pilotage	156
3.2. Chaîne de mesure et chaîne d’action	157
3.3. Conclusion	159
4. PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES (PTD)	160

4.1.	Rôle du PTD _____	160
4.2.	Définition du PTD _____	162
4.3.	Activités du PTD _____	164
4.4.	Intégration du PTD dans les réseaux GRAI _____	165
5.	CONCLUSION _____	168
CONCLUSION DE LA PARTIE 2 _____		170
		
CONCLUSION GENERALE _____		172
		
BIBLIOGRAPHIE _____		1776
		
ANNEXE 1		
CAS D'ETUDE INDUSTRIEL _____		194
1.	AVANT - PROPOS _____	196
2.	PRESENTATION DU CAS _____	196
3.	MULTI-MODELISATION _____	198
3.1.	Modélisation fonctionnelle (Modèle GRAI) _____	198
3.2.	Modélisation organique par centres de conduite _____	199
3.3.	Intégration des modèles fonctionnel et organique dans le référentiel tridimensionnel _____	201
4.	MECANISMES D'AGREGATION _____	202
4.1	Projection suivant l'axe des espaces : instanciation du modèle fonctionnel _____	202
4.2	Projection suivant l'axe des fonctions : instanciation du modèle organique _____	203
5.	GESTION DES EVENEMENTS ET ANALYSE DE CRITICITE _____	207

5.1	Analyse de criticité des événements de faible amplitude _____	207
5.2	Analyse de criticité des événements d'amplitude moyenne _____	209
6.	ETUDE DU PROCESSUS DU TRAITEMENT DES DONNEES _____	210
ANNEXE 2		
	RECAPITULATIF DES REGLES DE DIAGNOSTIC D'UN SYSTEME DE GESTION DE PRODUCTION _____	214

INTRODUCTION GENERALE

La versatilité des contraintes (économiques, financières, socio-techniques) de l'entreprise pousse celle-ci à une recherche permanente d'amélioration de ses performances globales et à faire preuve d'agilité dans un environnement de plus en plus mouvant. La modélisation d'entreprise, qui vise à offrir une représentation générique des systèmes de production en vue de leur évaluation, s'avère un outil d'analyse et de conception / reconception des systèmes de production, en vue d'en améliorer les performances, qui commence à pénétrer l'entreprise.

L'objectif général de cette thèse est de contribuer à accorder l'outil de modélisation aux besoins industriels d'analyse et de ré-ingénierie, afin de gérer le cycle de vie des systèmes de production.

L'étude porte pour une part sur l'exercice même de la modélisation, et pour une part sur l'usage de la modélisation dans la gestion de l'entreprise aux différents niveaux de pilotage, de l'exploitation du système de production à la gestion de son évolution. Les fils conducteurs de cette recherche ont été les suivants :

- Tenter une synthèse entre les différentes écoles de pensée de macro-modélisation et de micro-modélisation disponibles dans la littérature scientifique et dont on peut considérer que l'ensemble constitue la *modélisation d'entreprise* ;
- Contribuer à unifier les problématiques de gestion de production, de ré-ingénierie du système de production, de conception des produits, de gestion de l'évolution et de pilotage stratégique dans l'énoncé d'une problématique commune de pilotage, certes à des horizons temporels différents, de l'outil de production ;
- Tenter d'éclairer les pré-requis de la ré-ingénierie basée-modèle en suggérant les formes de modélisation les plus adaptées au contexte.

Sans doute notre contribution principale consiste-t-elle donc à relier un ensemble de problématiques de recherche autour de la modélisation d'entreprise et de son usage en entreprise.

Nous proposons de modéliser tout système de production suivant trois axes :

- un axe fonctionnel, qui décrit les fonctionnalités du système, c'est-à-dire les finalités qui justifient sa réalisation, sans présomption des modalités de réalisation. Les notions propres à ce point de vue sont ceux de fonction, processus, et activité.
- un axe organique, qui décrit l'architecture de réalisation du système. Les notions sous-jacentes sont l'organisation, la structure et l'agencement.
- Un axe évolutionniste, qui rend compte des transformations tant fonctionnelles qu'organiques du système au cours du temps.

La possibilité d'isoler et d'articuler les vues du système selon les axes fonctionnel, organique et évolutionniste nous semble en effet nécessaire pour assurer la cohérence des projets d'ingénierie qui rythment la vie du système :

- En conception initiale, il s'agit de passer d'un cahier des charges fonctionnel à une définition organique du système à réaliser.
- En reconception « légère », il s'agit souvent de retoucher la réalité organique du système (modifications de l'organisation opérationnelle) sans incidence toutefois sur les fonctionnalités du système. Il est courant pourtant de constater que les modifications organiques successives d'un système ont conduit, au fil des ans, à des dérives fonctionnelles par rapport à la justification initiale du système. La multiplication de « verrues » résultant de modifications consécutives du système en l'absence de cadre assurant la cohérence des projets dans le temps, conduit fatalement à une dégradation de l'efficacité globale de l'outil de production.
- Enfin, en reconception « lourde », il est nécessaire de revoir les spécifications fonctionnelles du système, suite à une évolution des besoins ou à une réorientation stratégique de l'entreprise. Il s'agit ensuite de traduire la définition fonctionnelle du système en une spécification organique, ce qui apparente la démarche au cas de la conception initiale.

Le manuscrit comporte deux parties.

La première partie vise à situer les limites des méthodes de modélisation actuelles, et propose un modèle multi – vue des systèmes de production.

Le chapitre 1 rappelle au préalable la problématique moderne de production induite par le développement des stratégies de partenariat, et analyse la littérature sur les méthodes de modélisation fonctionnelle et organique des systèmes de production.

Le chapitre 2 porte sur la modélisation évolutionniste des systèmes de production, et met en évidence que les cadres de modélisation actuellement reconnus dans le domaine scientifique ne permettent pas d'évaluer l'impact de modifications fonctionnelles du système sur sa propre constitution organique.

En conséquence, le chapitre 3 élabore un référentiel tridimensionnel de modélisation (espace, temps, fonction) se concentrant sur le pilotage et sur le système physique. Il vise, par l'intégration des vues fonctionnelle et organique, à atteindre une représentation unifiée du système. Ce modèle multi-vue se base sur les cadres de modélisation existants développés au laboratoire, que sont le modèle fonctionnel de conduite GRAI et la modélisation organique par centres de conduite.

La deuxième partie traite de l'usage de la modélisation multi - vue pour la gestion de l'évolution des systèmes de production.

Le chapitre 4 propose de considérer le pilotage de l'entreprise selon trois niveaux : un niveau de pilotage stratégique, en charge de maintenir la performance économique de l'entreprise dans son marché, et qui décide des projets de ré-ingénierie produit et / ou système à lancer ; un niveau de pilotage structurel, qui consiste en la ré-ingénierie proprement dite du système ; un niveau de pilotage opérationnel, en charge d'exploiter le système réel. Le chaînage des différents modèles du système permet de cadrer la ré-ingénierie d'un système de production donné, d'une part en structurant les spécifications en correspondance avec différents niveaux d'objectifs, d'autre part en déterminant les indicateurs de performance permettant de

comparer le futur système aux modèles de référence.

Enfin, le pilotage de la performance passe par une maîtrise du processus visant à produire les informations utiles au pilotage. Le chapitre 5 conclut ce mémoire par une investigation sur la définition et la représentation de la *logistique d'information* en vue du pilotage.

Nos propositions sont illustrées par l'analyse d'un cas industriel. Nous avons préféré présenter ces applications en annexe et concentrer le corps du texte sur les aspects conceptuels.

La conclusion générale synthétise l'apport et les limites de ce travail, et en présente les perspectives.

Partie

1

MODELISATION MULTI-VUE
DES SYSTEMES DE PRODUCTION

INTRODUCTION A LA PARTIE 1 :

MODELISATION MULTI-VUE DES

SYSTEMES DE PRODUCTION

La première partie de ce mémoire se concentre sur l'exercice de modélisation des systèmes de production et regroupe trois chapitres.

Le premier chapitre s'attache préalablement à rappeler la problématique actuelle de production puis, dans ce contexte, à analyser les écoles de modélisation d'entreprise. Après avoir présenté les stratégies de conduite mises en œuvre par les entreprises afin de faire face à l'évolution du marché, nous analysons dans un premier temps les modes d'organisation qui découlent de ces choix stratégiques. Parallèlement, nous rappelons qu'une entreprise peut être considérée sous l'angle de la systémique : un système de production est une organisation d'éléments interagissant dans le but de réaliser des fonctions (économiques, financières, sociales) déterminées. L'intérêt d'une telle approche est de rendre explicites, d'une part, les relations entre le système et son environnement, et d'autre part les relations entre les fonctions externes (c'est-à-dire vis-à-vis du marché) du système et son organisation interne. Puis, tant pour l'analyse structurée de la littérature scientifique du domaine « modélisation d'entreprise » que pour préparer le lecteur au référentiel de modélisation utilisé dans cette thèse, nous proposons de modéliser tout système de production suivant deux axes :

- un axe fonctionnel, qui décrit les fonctionnalités du système, c'est-à-dire les finalités qui justifient sa réalisation. Les concepts propres à ce point de vue sont ceux de fonction, processus, et activité.
- un axe organique, qui décrit l'architecture du système. Les concepts sous-jacents sont l'organisation, la structure et l'agencement.

Sans doute la portée générique de ce référentiel va-t-elle au-delà du contexte des systèmes de production. Pour notre part, nous limitons bien évidemment notre analyse à ce cadre spécifique.

Dans un second temps, le chapitre 1 se focalise sur la notion de pilotage. Le système de pilotage est considéré suivant les deux axes du référentiel précédemment défini (fonctionnel et organique). Le système de décision est généralement décomposé en sous-systèmes, eux-mêmes organisés en centres de décision, où chaque centre de décision est associé à une fonction et un niveau décisionnel particulier. Les systèmes de pilotage peuvent être subséquentement organisés selon diverses architectures mêlant des relations hiérarchiques et transversales entre plusieurs centres de décision, compte tenu de la structure du système physique de production à piloter, et des objectifs de gestion poursuivis.

Enfin, pour conclure ce premier chapitre, nous nous attachons à dresser un état de l'art des méthodes de modélisation fonctionnelle et organique de tout ou partie des systèmes de production. Nous positionnons également la problématique de notre recherche, en proposant une étude comparative des différentes méthodes de modélisation analysées, suivant différentes clés (cadre de modélisation, modèle de référence, formalisme de représentation, couverture du cycle de vie, etc.). Différents constats pourront ainsi être faits :

- peu de méthodes de modélisation proposent une approche prenant en compte *simultanément* les aspects fonctionnel et organique des systèmes. Les quelques approches mixtes existantes ne permettent pas d'isoler les vues fonctionnelle et organique.
- peu de méthodes de modélisation proposent une modélisation couvrant la totalité du cycle de vie des systèmes : concepts génériques, définition des besoins, conception, instanciation, implémentation, exploitation.
- peu de méthodes de modélisation considèrent le processus de gestion d'évolution du modèle sensé accompagner les évolution du système.

Le deuxième chapitre de cette première partie propose une revue des différentes approches pour la gestion de l'évolution des systèmes. Sont présentées les deux méthodes principales que sont le re-engineering et l'évolution continue, puis des approches développées au travers de projets d'envergure ayant permis de formaliser la problématique industrielle en matière de gestion de l'évolution de l'entreprise (projets EUREKA TIME GUIDE et RÉSYPROQ, méthode PETRA). Nous verrons qu'en réponse aux évolutions de son environnement et de ses éventuels dysfonctionnements internes, un système de production évolue avec une importance plus ou moins grande, en agissant sur sa constitution et / ou sur le produit fabriqué. La ré-ingénierie de tout ou partie du système de production et la conception de produits constituent subséquentement les deux variables d'action de la gestion de l'évolution. Toutefois, les approches évolutionnistes existantes ne permettent pas, en l'absence des vues fonctionnelle et organique, de considérer l'impact des scénarios de ré-ingénierie sur la remise en cause du système. Nous justifierons dès lors notre thématique de recherche visant à développer une méthode de modélisation intégrant, d'une part, les aspects fonctionnel et organique du système, et couvrant, d'autre part, toutes les étapes de son cycle de vie.

Le troisième et dernier chapitre de cette première partie élabore un modèle de référence tridimensionnel (espace, temps, fonction) se concentrant sur les aspects de gestion de production et sur le système physique. Il permet, par l'intégration des vues fonctionnelle et organique, d'atteindre une représentation unifiée du système de gestion de production offert aux analystes. Le référentiel tridimensionnel obtenu établit alors le lien entre les vues fonctionnelle et organique. Il rend possible la description du modèle du système de production à tout échelle du temps et de l'espace, et ce pour la mise en œuvre de toute fonction de la gestion de production. Différentes coupes ou projections de ce référentiel permettent enfin une étude spécifique du système considéré en ramenant le modèle à une vue fonctionnelle ou organique, et ce à un niveau décisionnel choisi. Pour illustrer ces propositions, nous nous appuyons sur deux approches de modélisation (l'une à dominante fonctionnelle : le modèle de conduite GRAI, l'autre à dominante organique : la modélisation par centres de conduite) développées au laboratoire.

Chapitre

1

MODELISATION FONCTIONNELLE ET ORGANIQUE
DES SYSTEMES DE PRODUCTION :
PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART

Sommaire Chapitre 1

Modélisation fonctionnelle et organique des systèmes de production :
Problématique et état de l'art

1. INTRODUCTION	21
2. PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE	21
2.1 La chaîne de valeur	21
2.2 Le Supply Chain Management ou Gestion de Chaînes Logistiques	22
2.3 Les réseaux d'entreprise	23
2.4 Conclusion	24
3. MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	24
3.1. Principes de modélisation des systèmes de production	24
3.1.1. Intérêt d'un modèle	24
3.1.2. Choix de modélisation	25
3.2. Modélisation externe des systèmes de production	26
3.3. Modélisation interne des systèmes de production	26
3.3.1. Modélisation fonctionnelle	26
3.3.2. Modélisation organique	27
4. MODELISATION DES SYSTEMES DE PILOTAGE	27
4.1. Définition du système de pilotage	27
4.2. Modélisation fonctionnelle du système de pilotage	28
4.2.1. Le centre de décision	29
4.2.1.1. Fonctions du pilotage	29
4.2.1.2. Niveaux de prise de décision	29
4.2.2. Processus de pilotage	30
4.2.2.1. Approche monolithique de la production	31
4.2.2.2. Approche hiérarchisée de la planification	31
4.3. Modélisation organique du système de pilotage	33
4.3.1. Relations de subordination	33
4.3.2. Relations « transversales » entre centres de décision de même niveau	34
4.3.3. Les différentes architectures des systèmes de pilotage	35

4.3.4. Conclusion	36
5. OUTILS ET METHODES POUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE	37
5.1. Modélisation fonctionnelle de l'entreprise	37
5.1.1. SADT / IDEF0	38
5.1.1.1. Présentation	38
5.1.1.2. Principes de modélisation	38
5.1.2. GIM	39
5.1.2.1. Présentation	39
5.1.2.2. Principes de modélisation	39
5.1.3. ACNOS	40
5.1.3.1. Présentation	40
5.1.3.2. Principes de modélisation	41
5.2. Modélisation organique de l'entreprise	41
5.2.1. L'approche multi- agents	41
5.2.1.1. Présentation	41
5.2.1.2. Principes de modélisation	42
5.2.2. L'approche holonique	43
5.2.2.1. Présentation	43
5.2.2.2. Principes de modélisation	43
5.3. Approches mixtes	44
5.3.1. CIMOSA	44
5.3.1.1. Présentation	44
5.3.1.2. Principes de modélisation	45
5.3.2. PERA	46
5.3.2.1. Présentation	46
5.3.2.2. Principes de modélisation	46
5.3.3. GERAM	47
5.3.3.1. Présentation	47
5.3.3.2. Principes de modélisation	48
5.3.4. IEM	49
5.3.4.1. Présentation	49
5.3.4.2. Principes de modélisation	49
5.3.5. MECI	50
5.3.5.1. Présentation	50
5.3.5.2. Principes de modélisation	50
6. CONCLUSION	51

1. INTRODUCTION

Avec la mondialisation et la globalisation de l'économie, l'entreprise doit aujourd'hui faire face au double défi de la réduction des coûts et de l'amélioration du service client, notamment du point de vue des délais et de la qualité des produits et/ou des services proposés. La demande étant de plus en plus à la spécialisation des produits et donc au raccourcissement des séries, l'entreprise doit désormais faire preuve d'*agilité*¹. Il faut « *ne plus fabriquer ce qu'on espère vendre, mais fabriquer ce qu'on peut vendre, et mieux, fabriquer ce qui a été vendu* » [Javel, 2000].

La littérature abonde sur la caractérisation des problématiques de production dans l'économie de marché mondialisée. Nous nous bornerons ici à un court paragraphe sur la problématique industrielle en nous concentrant sur l'essentiel. C'est ensuite une revue de l'état de l'art en modélisation d'entreprise qui constituera le corps de ce premier chapitre.

2. PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE

2.1 La chaîne de valeur

Dans les années 80, Porter a mis au point le concept de *chaîne de valeur* [Porter, 1986]. Il s'agit de décomposer l'activité de toute organisation ou entreprise en une séquence de sous-activités élémentaires, afin d'identifier les sources d'avantages concurrentiels potentiels. Deux types d'activités sont distingués : les activités principales (production, distribution, service après-vente) et les activités de soutien (activités administratives, ressources humaines, développement technologique, approvisionnement). La façon dont l'entreprise maîtrise chaque activité peut alors être définie, ce qui permet *a posteriori* de déterminer les principales sources d'avantages concurrentiels en comparant la chaîne de valeur de l'entreprise à celles de concurrents. En conséquence, l'entreprise peut choisir les secteurs sur lesquels se développer, afin de créer de la valeur et générer un niveau de marge (Figure 1.1).

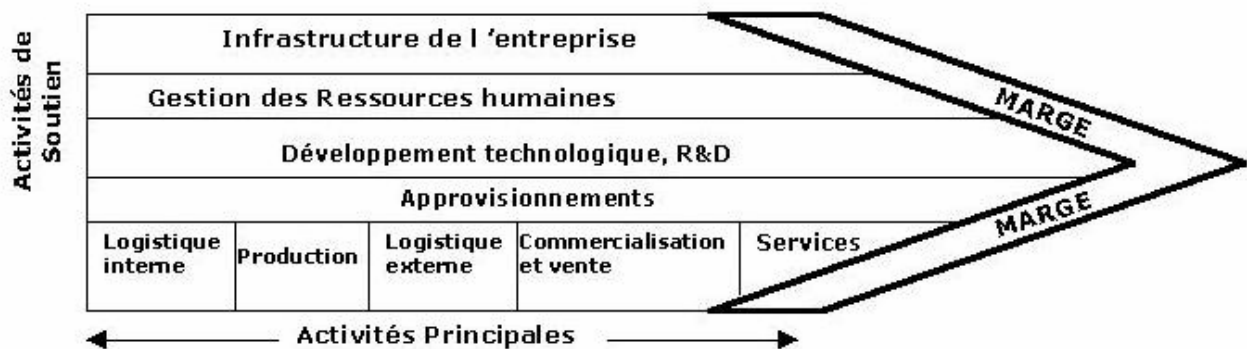


Figure 1.1 : La chaîne de valeur de Porter [Porter, 1986]

¹ Une entreprise dite agile est capable de reconfigurer rapidement ses ressources et ses méthodes afin de mieux répondre aux exigences du marché [Badot, 1998]

2.2 Le Supply Chain Management ou Gestion de Chaînes Logistiques

Le concept de *chaîne logistique*² s'adresse à l'organisation industrielle qui sous-tend la chaîne de valeur ajoutée. En effet, une chaîne logistique peut être définie en tant que « *système grâce auquel les entreprises amènent leurs produits et leurs services jusqu'à leurs clients* » [Poirier et Reiter, 2001], c'est-à-dire le système mettant en oeuvre les activités principales de la chaîne de valeur (Figure 1.2). Plus précisément, la chaîne logistique correspond à « *un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients, entre lesquels s'échangent des flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'information dans les deux sens* » [Tayur et al, 1999].

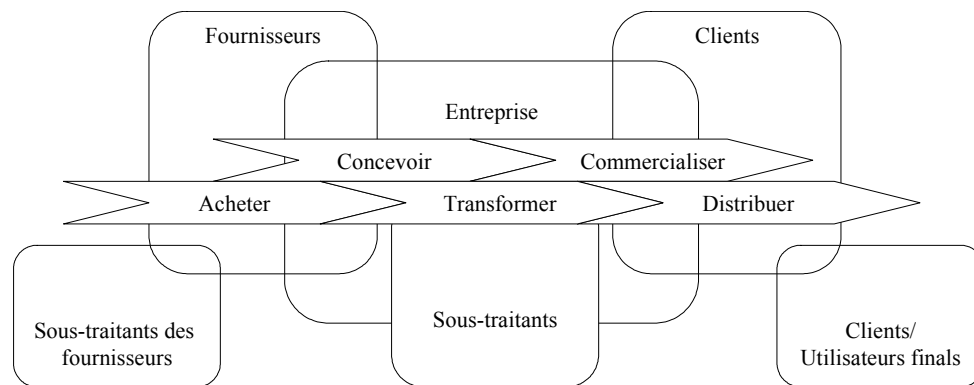


Figure 1.2 : Modèle de chaîne logistique, adapté de [Kearney, 1994]

Le terme de *Gestion de Chaînes Logistiques* ou *Supply Chain Management (SCM)*³ est apparu il y a une dizaine d'années. Il désigne « *la coordination systémique et stratégique des fonctions opérationnelles classiques, et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre, et de l'ensemble de la chaîne* » [Mentzer et al, 2001]. Le développement des chaînes logistiques est concomitant à celui des NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) qui permettent la communication commerciale et technique entre partenaires industriels. Notons que le terme « chaîne » s'entend du point de vue du processus de valeur ajoutée.

Dans le même temps s'est développée la notion de « réseaux d'entreprises » qui fait davantage référence à la topologie du partenariat, non nécessairement réduite à une simple chaîne.

En définitive, l'évolution récente des organisations industrielles reste fondée sur le paradigme d'intégration du système de production, dont les frontières dépassent désormais celles de l'entreprise pour atteindre celle d'une méta-entreprise résultant d'un partenariat plus ou moins pérenne entre acteurs industriels. Cette tendance fait dire à Kaisergruber que « *l'on ne peut plus du tout raisonner en se disant qu'une entreprise, c'est un employeur et des employés, et que c'est dans une ensemble bien clos, bien fermé, bien stable dans le temps* » [Kaisergruber, 1999].

² Pour une revue bibliographique sur ce thème, on pourra se reporter à [Telle, 2003]

³ Pour une revue bibliographique sur ce thème, on pourra se reporter à [Croom et al, 2000], [Tan, 2001] et [Thierry, 2003]

2.3 Les réseaux d'entreprise

Les partenariats industriels sont justifiés par la difficulté qu'éprouvent les entreprises à mettre en œuvre l'agilité qui leur permettrait, seules, de perdurer dans le marché. En effet, il existe un dilemme entre, d'une part, la flexibilité requise par le marché et, d'autre part, la nécessité pour l'entreprise de rester centrée sur son réel savoir-faire (core business) qui fait sa compétitivité. Une entreprise virtuelle (EV) peut être considérée comme une alliance temporaire d'entreprises indépendantes et éventuellement géographiquement dispersées qui participent aux différentes phases du cycle de vie d'un produit ou d'un service, en partageant ressources, compétences, coûts et savoir-faire dans le but de mieux répondre aux attentes du marché [Bernus et Nemes, 1999], [Jagdev and Browne, 1998]. La création d'une entreprise virtuelle permet ainsi d'augmenter le degré d'intégration de la chaîne de valeur des entreprises participantes [Chalmeta et Grangel, 2003], [Campagne et Sénéchal, 2002], de maîtriser les risques [Sardas et al, 2002], et d'accroître les compétences [Burlat, 2002]. Les collaborateurs sont liés par contrat jusqu'à entière réalisation de l'objectif, mais peuvent ensuite quitter la chaîne pour en rejoindre d'autres (Tableau 1.1). Une entreprise étendue (EE) est similaire, à ceci près que l'alliance entre partenaires est structurelle, fondée sur une entente plus ou moins pérenne [Davidow et Malone, 1997], typiquement à l'initiative d'un grand donneur d'ordres.

Phases	Activités	Sous activités
Création / Configuration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recherche de partenaires ▪ Mise en place ▪ Négociations / Accords ▪ Attribution et gestion des contrats ▪ Stratégie de l'EV ▪ Stratégie des partenaires 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Définition de l'EV ▪ Mission, vision et valeurs ▪ Objectifs et stratégie ▪ Politiques générales
Conception et Implémentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Définition de l'organisation hybride ▪ Conception du système intégré de gestion ▪ Programme d'implémentation de l'EV 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conception des décisions, ressources, fonctions et informations ▪ Evaluation du comportement dynamique ▪ Infrastructure d'information et communication
Exécution	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nouveaux objectifs de l'EV ou nouveaux besoins de l'organisation hybride 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mesure des performances
Dissolution	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recyclage et destruction 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestion du changement ▪ Plans d'action ▪ Evaluation ▪ Prise en compte des actions passées

Tableau 1.1: Cycle de vie d'une Entreprise Virtuelle [Chalmeta et Grangel, 2003]

2.4 Conclusion

Les entreprises doivent désormais faire preuve d'agilité. Ce comportement, induit par la compétition économique, est généralement contradictoire avec la nécessité pour l'entreprise de rester centrée sur son savoir-faire (core-business). Aussi, l'émergence des réseaux d'entreprises est-elle une réponse à ce dilemme, l'entreprise étendue offrant les caractéristiques requises d'adaptabilité au marché tout en évitant à ses acteurs une diversification et des investissements hasardeux. Dans ce contexte, la modélisation d'entreprise, qui vise à faciliter l'analyse des performances d'un système de production en rapport avec son organisation interne et son environnement industriel et commercial, est amenée à jouer un rôle croissant dans le développement des méthodes d'ingénierie, voire d'intelligence économique⁴.

3. MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

3.1. Principes de modélisation des systèmes de production

Dans ce mémoire, toute entreprise ou organisation d'entreprises (entreprise virtuelle) sera perçue comme un système. Le mot système vient du grec philosophique *sustéma*, signifiant *ensemble*. Il s'agit d'un « *ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* » [De Rosnay, 1975]. Par ailleurs, il faut remarquer que le rapport système / composant est récursif, car ces éléments peuvent être eux-mêmes des ensembles d'autres éléments à nouveau décomposables, et, *in fine*, des hommes ou des machines [Vautier, 2001]. Enfin, l'approche systémique considère, de manière indissociable, d'une part, les relations entre l'organisation interne et les fonctions du système, et, d'autre part, les relations entre le système et son environnement. Ces caractéristiques justifient pleinement l'usage de l'approche systémique pour l'analyse et la modélisation des systèmes de production [Lemoigne, 1994].

3.1.1. Intérêt d'un modèle

Un modèle est une « *structure logique ou mathématique formalisée, extraite de la réalité et utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui, bien que n'ayant pas de lien de causalité univoque, possèdent entre eux certaines relations*⁵. » C'est donc une image simplifiée de la réalité servant à comprendre le fonctionnement d'un système selon un point de vue donné. « *Tout modèle est constitué d'une part de la description de la structure du système étudié, qui incorpore les spécifications sémantiques intégrées, et d'autre part de la description des fonctionnements réguliers (ou non) et des dynamiques qui modifient cette structure au cours du temps* » [Bousquet et al, 2002]. Les modèles peuvent être simplement descriptifs ou explicatifs. Les modèles descriptifs saisissent l'invariant observé d'un système, sans démontrer le pourquoi de cette invariant, seul le résultat comptant. Les modèles explicatifs rendent compte d'un mécanisme ou processus génératif. Les modèles obtenus doivent permettre [GRP, 1999] :

⁴ L'intelligence économique est l'ensemble des activités liées à la recherche, au traitement et à la diffusion de renseignements utiles pour les prises de décision stratégiques dans l'entreprise [Rouibah and Ould-ali, 2002].

⁵ <http://www.granddictionnaire.com>

- La représentation du système (l'état actuel et les différentes possibilités d'état futur) ;
- L'évaluation du système (systèmes existant et futur) ;
- L'optimisation des performances du système (choix de la structure la plus adaptée en fonction de critères de choix).

3.1.2. Choix de modélisation

En vue d'une modélisation, tout système doit être appréhendé selon une vue externe et une vue interne. La vue externe décrit l'environnement du système ainsi que la finalité (les fonctions) du système dans cet environnement (ce pour quoi il a été conçu). La vue interne décrit tous les constituants du système et leurs interactions. Lemoigne préconise de modéliser la vue interne d'un système complexe suivant trois pôles : un pôle fonctionnel décrivant les finalités du système, un pôle « ontologique » permettant de décrire le système et ses spécificités, et un pôle génétique s'intéressant à l'évolution et au devenir du système (particulièrement les changements internes et externes faisant évoluer le système) [Lemoigne, 1994].

Nous retiendrons que pour modéliser un système, il est nécessaire de définir (Figure 1.3):

- Les limites du système avec son environnement, i.e. l'identification des éléments n'appartenant pas au système. Le choix de la frontière du système, qui permet de le distinguer de son environnement, dépend du point de vue de l'observateur. Celui-ci la choisit en fonction de son besoin de modéliser la réalité [Lemoigne, 1977] ;
- Les finalités du système dans son environnement, qui « expriment sa raison d'être en termes économiques, éthiques et sociologiques. Elles reflètent l'idée qu'un groupe humain se fait des missions d'un système, en ce sens qu'elles ne sont pas directement opératoires » [Mélèse, 1991] ;
- Les interactions du système avec son environnement, à savoir le type de relations et les influences de ces relations sur le système ;
- La vue interne fonctionnelle du système qui présente les processus mis en œuvre au sein du système ;
- La vue interne organique du système qui décrit les éléments composant le système, et les relations entre ces composants ;
- La dynamique d'évolution du système, en rapport avec l'évolution de l'environnement.

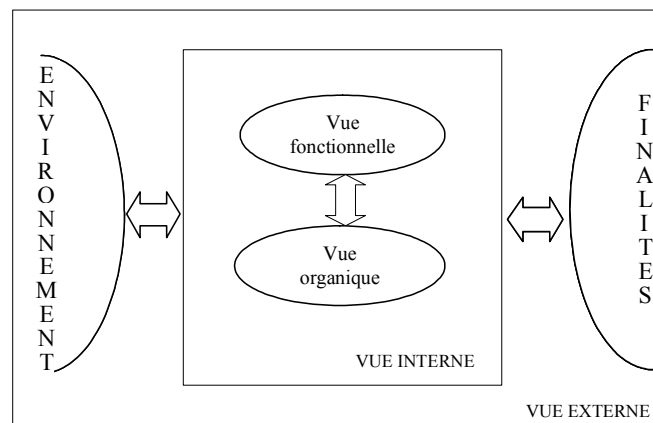


Figure 1.3 : Modélisation d'un système

3.2. Modélisation externe des systèmes de production

La vue externe met en évidence, pour un système donné, son rôle et ses interactions vis-à-vis de son environnement. Il s'agit des buts « de mission », qui caractérisent les sorties du système, attendues par son environnement [Mintzberg and Quinn, 1996].

Les paramètres composant l'environnement d'une entreprise sont nombreux. Tous sont variables au cours du temps et influent sur le fonctionnement de l'entreprise, avec un impact plus ou moins important. Afin de situer l'entreprise dans son environnement, nous proposons de classer ces paramètres en diverses catégories. Notons que la liste qui suit se veut générique mais non exhaustive, au vu de la complexité du paysage industriel actuel. Nous retiendrons principalement :

- Les facteurs financiers et économiques (inflation, croissance économique, ...), qui ont une incidence sur la politique de l'entreprise ;
- Les facteurs de marché, qui caractérisent l'environnement commercial de l'entreprise : ses fournisseurs, ses clients, ses sous-traitants, mais aussi ses concurrents. En amont, il s'agit du poids commercial des fournisseurs et plus généralement de l'évolution du prix des matières premières. En aval, il s'agit du marché des clients de l'entreprise, qui caractérise la demande. Enfin, il faut tenir compte de la menace des biens de substitution, de l'entrée de nouveaux concurrents et naturellement de la rivalité entre les entreprises déjà présentes sur le marché [Porter, 1986] ;
- Les facteurs technologiques, qui permettent aux entreprises d'espérer des avantages concurrentiels (irruption de nouveaux matériaux, intégration de nouveaux procédés, ...) ;
- Les facteurs juridiques, institutionnels et normatifs, qui déterminent les règles et normes à respecter par tout acteur industriel ;
- Les facteurs géographiques, qui peuvent avoir une influence sur la stratégie logistique des entreprises (infrastructures de transport) ;
- Les facteurs socioculturels et démographiques, qui conditionnent le marché de l'emploi ;
- etc.

Notons que la vue externe du système de production fait totale abstraction de la constitution de celui-ci, pour n'en retenir que ses rapports avec l'environnement. Il s'agit donc d'une représentation purement fonctionnelle du rôle d'acteur industriel de l'entreprise.

3.3. Modélisation interne des systèmes de production

3.3.1. Modélisation fonctionnelle

La vue fonctionnelle d'un système décrit les fonctions internes permettant à celui-ci d'exercer les fonctions externes mentionnées au paragraphe précédent, sans présomption de l'organisation elle-même. Les concepts se rattachant à ce point de vue sont principalement ceux de fonction, processus et activité [Trentesaux, 2002]. Les termes fonctions, processus et activités se recoupent très souvent dans la littérature. Nous considérons qu'en effet cette terminologie est propre à la vue fonctionnelle d'un système et renvoie à des niveaux de spécification : une fonction met en œuvre des processus, eux-mêmes résultant d'activités inter-reliées.

3.3.2. Modélisation organique

La modélisation organique d'un système décrit l'organisation des ressources rendant le système opérant. Il s'agit donc de rendre compte de la manière dont les fonctionnalités du système (ou buts « de système », qui concernent l'organisation à mettre en place pour atteindre ses buts « de mission » [Mintzberg and Quinn, 1996]) sont réalisées. En conséquence, la modélisation organique d'un système décrit une réalisation. Elle procure une description des ressources utilisées (ateliers, machines, stocks), et de la dynamique des flux matériels et informationnels entre ces ressources. La réalité organique des systèmes de production étant généralement très complexe, il est nécessaire de munir la représentation de mécanismes de décomposition récursive. La récursivité permet ici d'illustrer à la fois la décomposition d'un système en sous-systèmes et l'intégration de ces sous-systèmes au sein du système agrégé [Trentesaux, 2002].

Une ressource est un moyen humain ou technique (ressource de transformation, de stockage ou de transport) qui, lorsqu'il est disponible, participe à la réalisation d'une activité. La vue organique telle que nous l'entendons consiste donc en l'étude des agencement, structure et organisation des *ressources*. L'agencement consiste en la disposition, les unes par rapport aux autres, de toutes les ressources (techniques et / ou humaines) d'une entreprise, en vue d'en tirer le meilleur rendement possible. [Camalot, 2000] décrit l'agencement comme « *la manière dont les différents organes et individus d'un système sont mis en relation* ». La structure (parfois remplacée par le terme architecture) fait alors référence à l'ensemble des relations suffisamment stables et permanentes liant les parties entre elles [Lemoigne, 1995], [Beving, 1995], [Marcotte, 1995]. Enfin, l'organisation est l'ensemble des moyens employés (ressources) pour diviser le travail en activités distinctes et ensuite assurer la coordination entre ces activités [Mintzberg, 1994]. Elle se définit, comme l'agencement, dans une logique récursive et descendante.

4. MODELISATION DES SYSTEMES DE PILOTAGE

4.1. Définition du système de pilotage

Classiquement, tout système peut être décomposé en deux entités : un sous-système physique ou système piloté, et un sous-système de pilotage qui pilote le système physique [Doumeingts et Vallespir, 1994]. Le système de pilotage est à son tour décomposé en deux entités : le système de décision et le système d'information (Figure 1.4).

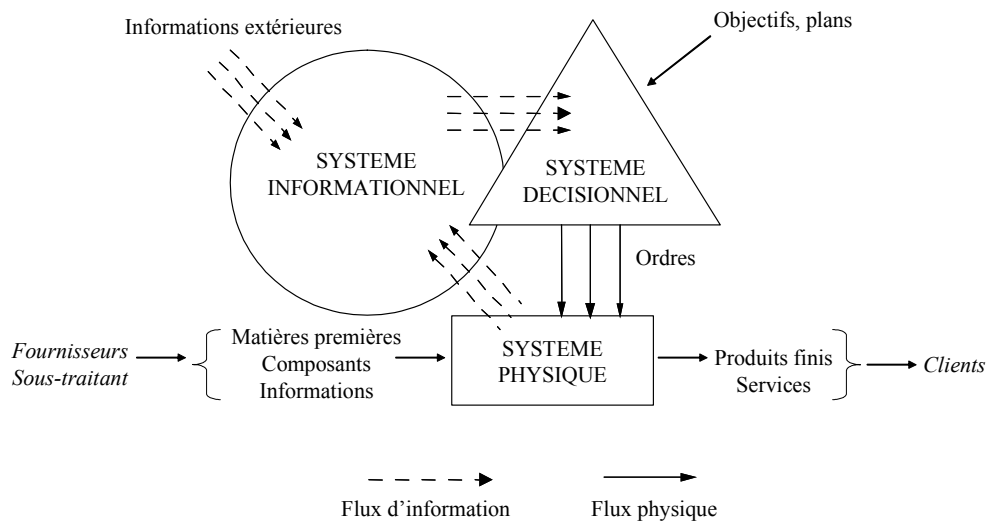


Figure 1.4 : Décomposition d'un système de gestion de production
[Doumeingts et Vallespir, 1994]

Le système physique assure la transformation des produits (matière première, composant, etc.). Le système d'information traite à la fois les informations de suivi issues du système physique et les informations extérieures, puis les transmet au système de décision. Ce dernier élabore sur cette base l'ensemble des décisions qui permettent de piloter le système physique.

Le pilotage des activités de production peut être rapproché de la définition du pilotage d'un engin [Mélèse, 1972] : « *Piloter un engin, c'est choisir un objectif, définir la meilleure trajectoire, lancer l'engin puis corriger en permanence ses écarts par rapport à la trajectoire ; éventuellement aussi, c'est modifier en cours de route la trajectoire ou même l'objectif lorsque les informations sur l'état extérieur et sur le comportement de l'engin montrent que le plan initial ne peut être maintenu* ».

Le pilotage d'un système de production ne déroge pas à ces concepts : il faut en effet définir les cibles et mettre en œuvre les plans d'action qui généreront les résultats escomptés, en dépit des dysfonctionnements internes au système et des incertitudes relatives à l'environnement de production. De manière générale, un plan d'action décrit « *les actions à mener et les moyens nécessaires pour atteindre les objectifs quantitatifs et qualitatifs d'une unité de travail* » [GDT, 2004]. Dans le cadre d'un tel plan, « *des moyens d'actions sont définis, c'est-à-dire les éléments actifs pour l'amélioration de la performance considérée ; ils concernent les ressources (capacité...), les processus (méthodologie...), ainsi que les échéances* » [AFGI, 1992] [CPC, 1997].

4.2. Modélisation fonctionnelle du système de pilotage

Un processus de pilotage est nécessairement décisionnel [Dilts et al, 1991]. Le système de décision est généralement décomposé en sous-systèmes, organisés en centres de décision⁶ [Doumeingts et al, 1998], [Pujo et Kieffer, 2002], où chaque centre de décision est associé à une fonction et un niveau décisionnel particulier. Nous rappelons ici le concept de centre de décision, cœur d'une modélisation fonctionnelle du système de pilotage.

⁶ Un centre de décision assure la coordination de tout ou partie d'une entreprise, voire d'un réseau d'entreprises, selon que le système global est une entreprise réelle ou une entreprise virtuelle.

4.2.1. Le centre de décision

4.2.1.1. Fonctions du pilotage

Les trois fonctions principales du pilotage en gestion de production sont : gérer les produits, gérer les ressources et planifier les activités.

- La fonction Gérer les Produits (GP) comprend à la fois la gestion des achats et la gestion des approvisionnements et des stocks. La première assure la négociation avec les fournisseurs, le choix de ceux-ci, la définition des commandes et les relances de commandes si besoin est. Les objectifs sont de minimiser les prix et de maîtriser les délais d'approvisionnement et la qualité des produits achetés chez les fournisseurs. La seconde permet d'assurer la fourniture des produits nécessaires à la production, avec l'anticipation requise par la planification, et la maîtrise des encours financiers de stockage. Les objectifs sont de minimiser les quantités en stock (stocks de roulement, de sécurité, d'anticipation, et d'en-cours) et d'assurer une sécurité face aux aléas de la production et des livraisons.
- Gérer les Ressources (GR), c'est optimiser l'utilisation des compétences humaines et des machines disponibles, conformément aux stratégies de l'entreprise. Il s'agit alors de définir les types de moyens de production, les investissements humains et matériels, le profil puis l'affectation du personnel, etc., tout en prenant en compte dans la planification la maintenance préventive et les besoins de formation du personnel.
- La fonction Planifier (PL) permet de traduire les objectifs stratégiques de l'entreprise en programmation d'activités. Elle synchronise et coordonne les deux autres fonctions afin de tenir compte de l'approvisionnement des matières et des ressources de production disponibles, et regroupe l'ensemble des principes et des méthodes qui permettent de déterminer le plan de réalisation des produits demandés. La fonction planifier regroupe donc toutes les activités établissant les moyens d'action à mettre en œuvre en vue de la réalisation optimale des objectifs fixés.

4.2.1.2. Niveaux de prise de décision

Le découpage hiérarchique du système décisionnel en trois niveaux (stratégique, tactique et opérationnel) est largement adopté en gestion de production [Antony, 1965]. Le niveau stratégique regroupe toutes les décisions permettant de définir les buts à atteindre sur un horizon à long ou à très long terme. Le niveau tactique prend en compte l'organisation du système à un niveau moyen terme. Enfin, le niveau opérationnel décrit les activités de gestion sur le court terme et le très court terme en intégrant les contraintes techniques. Malgré tout, dans la pratique, il est parfois difficile de faire la distinction entre ces trois niveaux. Néanmoins, il reste généralement vrai que les niveaux hiérarchiques élevés s'attachent aux décisions stratégiques engageant les investissements sur le long terme, à l'inverse des niveaux inférieurs de décision qui considèrent les actions opérationnelles à court terme.

Il est important de noter qu'une telle structuration du pilotage va de pair avec la nécessité d'agrèger les données utilisées dans la résolution de chaque type de décision. L'agrégation d'informations peut être définie 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 agrégées* » [Mercé, 1987]. Ceci permet de diminuer la complexité des modèles d'un système en diminuant le nombre de variables manipulées. En gestion de production, il peut être nécessaire d'agrèger l'information relative aux produits (matières), aux ressources ou moyens de production, au travail (activités) ou au temps. L'agrégation des matières et des ressources se fait généralement par regroupements d'objets (familles de produits, famille de machines, etc.) ne se différenciant que par des caractéristiques jugées secondaires. De même, l'agrégation du travail rassemble des tâches ayant des caractéristiques

communes. Enfin, l'agrégation du temps amène à regrouper plusieurs périodes consécutives de planification en une seule [Fontan et al, 1995]. Certains auteurs font remarquer qu'une prévision sur des données agrégées peut s'avérer plus fiable et plus réaliste qu'une prévision sur des données détaillées, par un phénomène de compensation d'erreurs d'incertitudes [Hétreux et al, 1995].

4.2.2. Processus de pilotage

Le pilotage est vu comme étant « *un mécanisme multi – niveau, hiérarchisé (chaque niveau cadrant le suivant) et bouclé (répercussion et correction des écarts). Ces niveaux, qui ne sont pas à confondre avec les niveaux hiérarchiques de l'organigramme de l'entreprise, sont chacun caractérisés par leur horizon (visibilité), leur période (réactualisation) et leur maille (résolution). Le processus consiste alors, niveau par niveau, par cadrages successifs, à préparer formellement, progressivement, en cohérence et avec une exécutabilité croissante les conditions de la réalisation pour se terminer par l'émission d'ordres exécutoires vers le processus physique. Le processus est fait de comparaisons, d'itérations, de simulations..., et, pour atteindre les objectifs fixés, nécessite entre autres des moyens de mesure et d'évaluation (indicateurs ou cadrans), et des moyens d'actions (variables de décision ou leviers)* » [AFGI, 1992].

Le processus de pilotage des systèmes de production consiste en l'enchaînement des cinq étapes ou niveaux décisionnels suivants [Aléonard et al, 1994] :

- La planification : « *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* » [Giard, 1988]. La planification aboutit à la définition du plan directeur de production (PDP), à partir des objectifs commerciaux et financiers de production.
- La programmation : elle permet d'établir le programme prévisionnel de production à partir du PDP, et définit les besoins nets en fonction des quantités et des délais de production, des approvisionnements et des quantités en stocks.
- 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* » [GOTH, 1993]. L'ordonnancement élabore ainsi un planning détaillé de production en fonction de la charge et de la disponibilité des moyens de production.
- La conduite : à partir du planning détaillé de production, la conduite doit réaliser la production prévue. A ces fins, elle intègre l'ensemble des contraintes de fabrication (arrêts maintenance, pannes, contrôle qualité, etc.).
- La commande : elle interagit avec le système physique, au niveau décisionnel le plus bas. Elle joue le rôle d'interface et traduit un ordre en séquence automatique [Pujo et Kieffer, 2002].

La planification, la programmation et l'ordonnancement concernent des décisions prises avant lancement et exécution de la production : il s'agit de gestion prévisionnelle. A contrario, la conduite et la commande concernent des décisions prises en parallèle avec le lancement et l'exécution de la production : il s'agit de pilotage en temps réel (Figure 1.5).

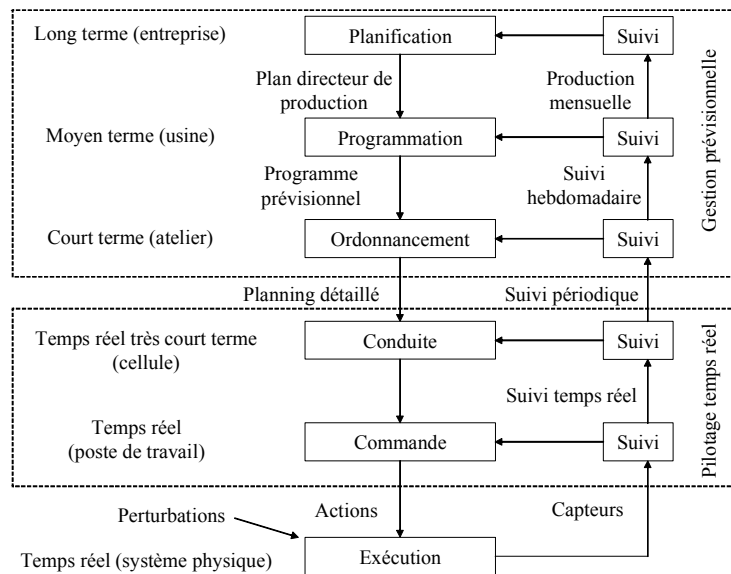


Figure 1.5 : Horizons de décision pour le pilotage de la production [Aléonard et al, 1994]

Les outils et systèmes d'aide au pilotage disponibles dans l'offre informatique (ERP⁷ et MES⁸) concrétisent ce découpage.

Concernant la planification de la production, on rencontre deux écoles dans la littérature : l'approche monolithique et l'approche hiérarchisée.

4.2.2.1. Approche monolithique de la production

Dans le cas de l'approche monolithique, le plan de production est successivement affiné en plusieurs plans, liés les uns aux autres via des boucles de régulation. La méthode MRP (Material Requirement Planning) [Orlicky, 1975] est une méthode de planification très répandue dans l'industrie manufacturière. Elle s'appuie sur les prévisions de commande et les niveaux de stocks en composants et produits semi-finis pour organiser la production en gérant la disponibilité des constituants d'un produit et la capacité des ressources au moment voulu. La méthode MRP2 apporte une réduction significative des stocks, une amélioration de la productivité et une rigueur dans la gestion de la production. Néanmoins, c'est une organisation complexe qui, pour être fructueuse, requiert des données extrêmement fiables (nomenclatures, gammes de fabrication, niveaux de stocks). Basée sur une organisation très planifiée de la production, il lui est souvent reproché une grande rigidité, au moment où les pré-requis du marché exigent une meilleure adaptativité des systèmes de production.

4.2.2.2. Approche hiérarchisée de la planification

La planification hiérarchisée se base sur une approche itérative procédant par raffinement successif du plan de production, sur la base de données de plus en plus détaillées [Hax and Meal, 1975], [Axsäter, 1981], [Bitran et al, 1981], [Gershwin, 1987],

⁷ L'objectif majeur des ERP (Enterprise Resource Planning) ou processus de Gestion Industrielle Intégrée 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 de l'entreprise. Pour une revue sur ce thème, voir le compte-rendu de la journée d'étude « Propos raisonnables sur les ERP », organisée à l'école des Mines de Paris le 03 Juillet 2002.

⁸ 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 » [Freitas, 1999].

[Mehra et al, 1996]. Le premier plan calculé est basé sur des données agrégées de la production et un horizon temporel⁹ long, raffiné à différents niveaux de désagrégation de la planification. Plus on descend dans la décomposition hiérarchique, plus les données manipulées sont détaillées et plus les horizons temporels sont courts. Chaque niveau de la structure hiérarchisée dénoue ainsi un problème particulier à partir d'une modélisation spécifique. Cependant, chaque problème ne peut pas être traité indépendamment des autres et des mécanismes assurant la coordination inter-niveau doivent être mis en place [Hétreux et al, 1995]. Pour ces auteurs, effectivement, une décision agrégée sera dite robuste si elle permet au niveau inférieur d'élaborer une décision détaillée, et une décision détaillée sera dite cohérente si elle est compatible avec les décisions agrégées (Figure 1.6).

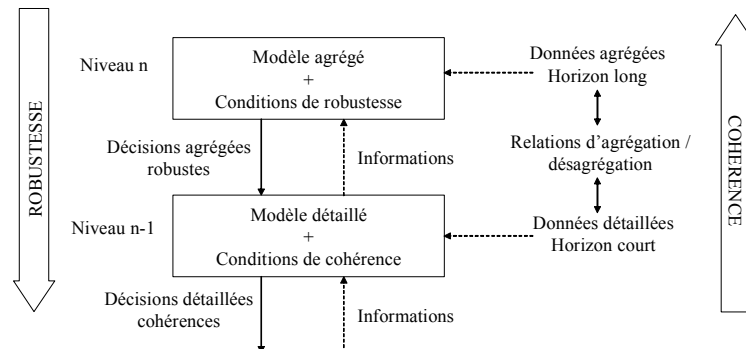


Figure 1.6 : Structure de planification hiérarchisée [Mercé, 1987]

Par ailleurs, la désagrégation des données nécessaire à la décomposition du plan peut s'effectuer par processus statique ou dynamique [Hétreux et al, 1995]. Dans le premier cas, la décision détaillée est construite sur la totalité de l'horizon considéré du niveau agrégé. Dans l'autre cas, une suite de décisions détaillées est élaborée par une succession de désagrégations partielles.

L'avantage principal de l'approche hiérarchisée de la planification est la limitation du nombre de données à prendre simultanément en compte. En découlent par ailleurs les avantages suivants [Dempster et al, 1981] :

- Un faible coût de traitement (résolution de problèmes moindres, temps de calcul faible) ;
- Selon certains auteurs, une meilleure fiabilité des données en vertu du phénomène de compensation des incertitudes ;
- Une meilleure aptitude à absorber les événements aléatoires. En effet, des événements aléatoires à faible impact sont ingérés par les niveaux de plus bas niveaux, tandis que les événements aléatoires d'amplitude plus importante sont absorbés par les niveaux supérieurs [Vacher, 2000].

Néanmoins, cette approche n'a pas à l'heure actuelle de véritable impact industriel. Les raisons que l'on peut avancer sont les suivantes :

- Les difficultés théoriques inhérentes à l'agrégation des données techniques [Zolghadri, 1998];
- L'emprise des ERP sur le marché des outils de gestion de production, largement basée sur l'approche MPR2 ;

⁹ Un horizon temporel correspond à la durée de la portée de la décision.

- Le faible nombre de recherches dans ce domaine par rapport aux approches monolithiques.

4.3. Modélisation organique du système de pilotage

Nous abordons maintenant la description organique des systèmes de pilotage, qui traduit les modalités de réalisation des fonctions de ces systèmes : quelle est l'architecture générale d'un système de pilotage, quelle est la distribution des centres de décision, quels rapports ces centres entretiennent-ils entre eux.

Les centres de décision, véritables composants du système de pilotage, peuvent en effet interagir selon plusieurs types de relations. Cette typologie détermine les différentes architectures de pilotage rencontrées dans la littérature et qui sont à la base de l'organisation de l'entreprise.

4.3.1. Relations de subordination

Les liens de subordination ou de hiérarchie consistent en des décisions et des retours d'information, lorsque les centres de décision appartiennent à des niveaux décisionnels différents. Ce type de lien assure la cohérence « verticale » du pilotage, l'atteinte des objectifs globaux contribuant à celle de l'objectif global. La théorie des systèmes hiérarchisés [Mesarovic et al, 1980] propose trois principes de décomposition des systèmes complexes : par strates, par couches ou par échelons. Notons qu'une structure de décision hiérarchisée s'accompagne nécessairement d'un processus de désagrégation des données manipulées.

Premièrement, un système peut être décrit suivant différents niveaux d'abstraction. Ces niveaux constituent les *strates* du système, décrivant chacune le système complet, seul le niveau de détail différent (Figure 1.7).

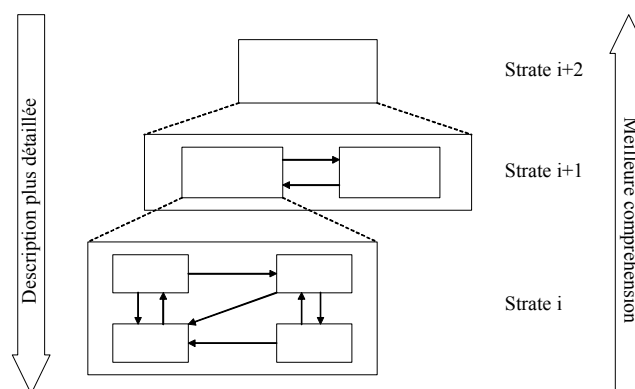


Figure 1.7 : Décomposition par strates [Mesarovic et al, 1980]

Deuxièmement, un système complexe peut être décomposé en sous-systèmes correspondant aux sous-problèmes de la problématique globale de pilotage. Une *couche* correspond alors à une étape dans la séquence de la prise de décision, et la position de la couche considérée par rapport aux autres couches est le résultat de la forme logique de la séquence. Chaque couche pilote l'ensemble des éléments situés sur les couches inférieures et reçoit de celles-ci des informations de suivi la renseignant sur leur état et par là-même la guidant dans ses décisions¹⁰ (Figure 1.8).

¹⁰ Une représentation classique de décomposition par couches en gestion de production est l'approche MRP ou MRP2 (cf. § 4.2.2.1).

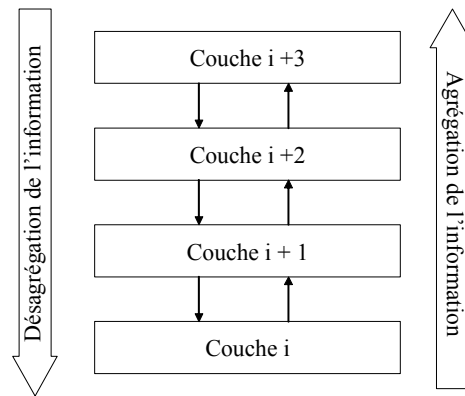


Figure 1.8 : Décomposition par couches

Enfin, une décomposition par *échelons* combine les découpages par *strates* et par *couches* précédemment abordés. Un système de pilotage organisé par ce type de décomposition met en jeu une famille de sous-systèmes en interaction, certains d'entre eux étant définis comme des unités de décision, organisées hiérarchiquement. Chaque niveau hiérarchique possède une certaine autonomie de décision, ses activités n'étant pas toutes contrôlées par les niveaux supérieurs. Ceci permet de décentraliser la prise de décision et conduit à une structure récursive du système de pilotage (Figure 1.9).

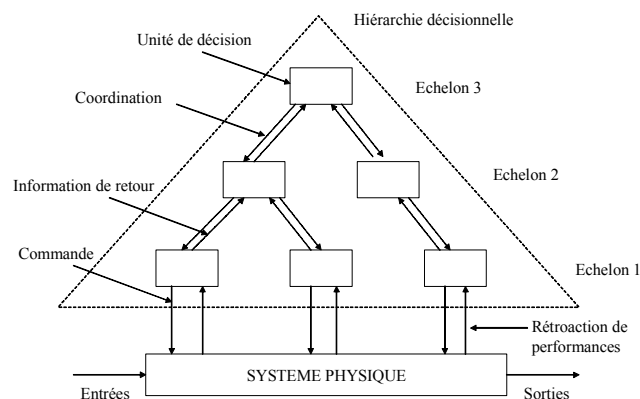


Figure 1.9 : Décomposition par échelons [Mesarovic et al, 1980]

4.3.2. Relations « transversales » entre centres de décision de même niveau

Il existe différents types d'ententes industrielles qui supposent une approche transversale (i.e. non hiérarchique) entre centres de décision indépendants, de même niveau [Lauras et al, 2003], [Telle, 2003]. Il s'agit de prises de décision commune, d'échanges d'information concernant les objectifs, actions enclenchées ou expressions de performance [Monteiro, 2001]. Les entités appartenant à un même niveau, une cohérence « horizontale » du pilotage est assurée, c'est-à-dire que les objectifs de chaque centre de décision du même niveau ne sont pas contradictoires entre eux.

Nous retiendrons les termes de communication, collaboration, coopération, et coordination.

- La *communication* s'entend comme un échange d'informations relativement informel et peu formaté. Cet échange, majoritairement ponctuel, est souvent lié à une circonstance, telle la transmission d'une nouvelle [Lauras et al, 2003].
- La *collaboration* permet à différents opérateurs de travailler ensemble à l'exécution d'une action donnée, dans le but d'atteindre un résultat final [Camalot, 2000]. Lorsqu'elle

consiste en une prise de décision, on parle alors de *codécision*. La collaboration est basée sur un engagement réciproque des acteurs, pour résoudre ensemble le problème posé [Dillenbourg et al, 1996].

- La *coopération* consiste en une action collective organisée autour d'un ensemble d'acteurs partageant un but commun, ou tout du moins une action collective où chaque acteur y trouve son compte. C'est une « *articulation effective et concrète d'acteurs autour d'une action commune* » [Bareigts, 2000], ou encore « *l'ensemble des liens que construisent volontairement entre eux deux agents afin de faire face à une situation nouvelle* » [Capul, 1998]. La différence entre coopération et collaboration est subtile, puisqu'il s'agit dans les deux cas d'un travail réalisé en commun [Legardeur et al, 2003] dans un jeu « gagnant – gagnant ». On peut différencier les deux notions en parlant d'*état de collaboration*, qui illustre le fait que des activités sont synchronisées au fur et à mesure de l'avancement des travaux, et de *processus de coopération*, où le travail est divisé en une succession d'activités indépendantes, la cohérence globale étant assurée lors de l'assemblage des résultats intermédiaires [Brna, 1998].

- La *coordination* assure la synchronisation des actions individuelles et la cohérence de ces actions par rapport à l'ensemble du processus [Camalot, 2000]. La coordination procède d'une volonté de maîtrise globale du comportement du système piloté. Il s'agit donc de contrôler *explicitement* la cohérence des activités du processus piloté, ce qui en définitive constitue le cœur de la gestion.

4.3.3. Les différentes architectures des systèmes de pilotage

Les systèmes de pilotage peuvent être organisés selon diverses architectures mêlant des relations hiérarchiques et transversales entre centres de décision, compte tenu de la structure du système physique de production à piloter et des objectifs de gestion poursuivis [Pujo et Kieffer, 2002], [Charpentier et al, 2001]. On parle ainsi d'architectures centralisée, hiérarchisée, coordonnée, décentralisée, distribuée, et distribuée supervisée (Figure 1.10).

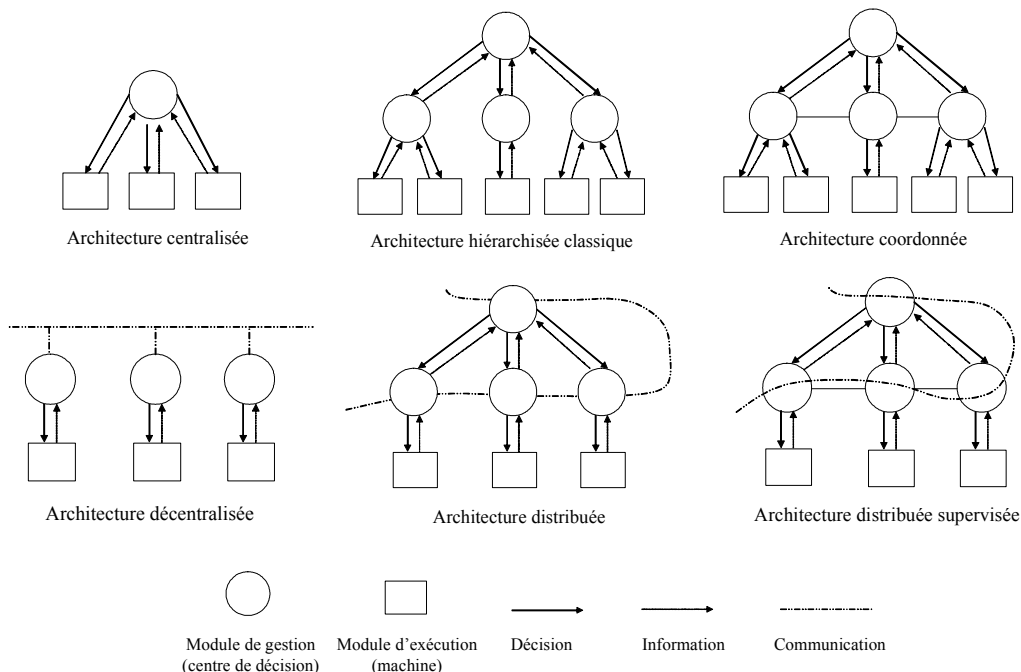


Figure 1.10 : Architectures des systèmes de pilotage [Pujo et Kieffer, 2002]

Dans une architecture centralisée, une ressource unique supervise la production, gère les événements imprévus et assure la coordination de toutes les tâches à effectuer. Cette architecture, lorsqu'elle est rigide, ne s'applique qu'à de petits et moyens systèmes.

Dans une architecture hiérarchisée, chaque niveau décisionnel pilote les niveaux inférieurs, et ce récursivement jusqu'au niveau le plus bas. Une telle architecture n'autorise que des liens de subordination. La coordination entre centres de décision d'un même niveau dépend donc d'un centre de décision de niveau supérieur.

Une architecture coordonnée complète cette approche par des liens de coopération entre centres de décision de même niveau, qui procurent une plus grande capacité de décision locale, et permettent ainsi une meilleure réactivité du système de pilotage, face à l'irruption d'aléas qu'il est possible d'absorber localement.

Une structure distribuée vise à délocaliser la décision (chaque centre de décision pilote un centre local de production), ce qui permet aux informations de circuler plus facilement entre chaque centre de décision.

Dans une architecture décentralisée, tous les centres de décision sont au même niveau hiérarchique et les centres de décision s'auto-organisent pour coordonner l'ensemble.

Enfin, une architecture distribuée supervisée résulte d'un compromis entre les architectures distribuée et décentralisée, qui permet à chaque centre de décision de communiquer et de coopérer avec les autres centres, en remettant si nécessaire en cause les décisions initialement prises.

Certains auteurs emploient le terme « hétéarchie » pour parler d'architectures non hiérarchiques [Huhns, 1987], [Duffie & Prabhu, 1996]. Ce terme a été formé à partir de deux termes grecs : *heteros* (autre) et *Arckhein* (commander), signifiant « commandement par les autres ». Il est de plus en plus rencontré dans le domaine du pilotage non centralisé. Trentesaux souligne les avantages des systèmes de pilotage hétéarchique par rapport aux systèmes de pilotage hiérarchique [Trentesaux, 2002]. La réduction des liens hiérarchiques permet en effet d'accroître la réactivité aux aléas divers [Pujo et al, 1999], d'être plus robuste en cas de dysfonctionnements [Zwingelstein, 1996] et plus adaptable aux organisations industrielles actuelles (entreprise virtuelle ou étendue). En contrepartie, la faiblesse des approches hétéarchiques réside dans la difficulté de résolution des conflits entre entres de décision [Hirsch et al, 1996], et dans l'imprévisibilité de la durée du processus de décision [Duffie & Prabhu, 1996]. Ainsi, « afin de profiter de la compétence des décideurs et de la pertinence des décisions, une organisation multi-niveau doit assurer un équilibre entre hiérarchie et décentralisation d'une part et autonomie des décideurs et centralisation d'autre part » [Cauvin et al, 2002]. L'arbitrage entre solutions hétéarchique et hiérarchique est donc indissociable du dilemme robustesse / performance.

4.3.4. Conclusion

La description organique d'un système de pilotage fait apparaître, d'une part, les composants (centres de décision) de ce système et, d'autre part, les interrelations entre ces composants, selon différentes structures. Notons que les liens hiérarchiques sont majoritairement structurels et durables tandis que les liens coopératifs sont souvent négociés et provisoires.

La sémantique des relations entre centres de décision doit également s'apprécier par la nature des informations échangées. Dans sa thèse, Lecompte base la relation client / fournisseur sur une transaction de *produits* (c'est-à-dire de matière ouvrée) et la relation donneur d'ordre / sous-traitant sur une transaction de *transformations* (c'est-à-dire de travaux) [Lecompte, 2001].

Il s'ensuit que tout centre de décision peut être impliqué simultanément dans les relations génériques suivantes¹¹ (Figure 1.11) :

- Une relation donneur d'ordres hiérarchique / sous-traitant hiérarchique par laquelle un centre de décision reçoit ou émet une commande de transformations ;
- Une relation coopérative donneur d'ordres / sous-traitant par laquelle un centre de décision reçoit ou émet une commande de transformations ;
- Une relation client hiérarchique / fournisseur hiérarchique par laquelle un centre de décision reçoit ou émet une commande de produits ;
- Une relation coopérative client / fournisseur par laquelle un centre de décision reçoit ou émet une commande de produits.

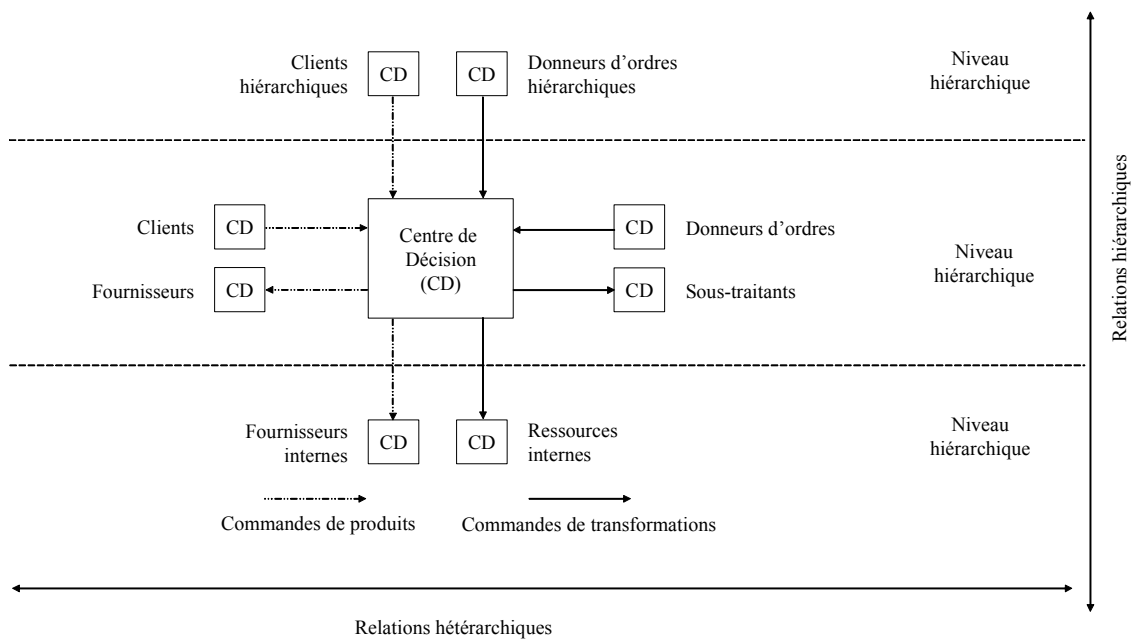


Figure 1.11 : Relations entre centres de décision [Lecompte, 2001]

5. OUTILS ET METHODES POUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE

Nous présentons ici les principaux outils pour la modélisation d'entreprise, selon les points de vue fonctionnel et organique. En fin de paragraphe, un bilan permettra de mettre en évidence les lacunes de ces outils et de positionner la problématique de notre recherche.

5.1. Modélisation fonctionnelle de l'entreprise

Voici les principales approches, qui, selon nous, relèvent de la modélisation fonctionnelle des systèmes de production et / ou de leurs systèmes de pilotage, leur point commun étant de se focaliser sur la description des processus mis en œuvre par ces systèmes, sans chercher à en détailler la réalisation. La représentation du système piloté (« système physique ») demeure, dans ce type d'approche, abstraite.

¹¹ Cette représentation générique a vocation à être instanciée plus simplement. Il est rare en effet de rencontrer des cas cumulant la totalité des relations citées.

5.1.1. SADT / IDEF0

5.1.1.1.Présentation

SADT (Structured Analysis and Design Technique) est une méthode générale d'analyse et de conception de systèmes [Ross, 1977]. Elle se base sur une approche systémique en considérant que toute entreprise ou système complexe est une structure composée de sous-systèmes plus simples en interaction. Les objectifs sont de décrire les fonctions mises en œuvre par le système, les processus et objets impliqués par ces fonctions, en se bornant par ailleurs à identifier les mécanismes et les ressources nécessaires à l'exécution de ces fonctions.

5.1.1.2.Principes de modélisation

L'élément de base de SADT / IDEF0 est l'activité [ICAM, 1981]. Une activité transforme des objets d'entrée (données ou matières) en objets de sortie (données, matières), grâce à des ressources (humaines ou techniques) exécutant l'activité, sous l'influence de contrôles (directives, procédures, contraintes, etc.).

La modélisation d'une activité comporte ainsi plusieurs étapes :

- L'identification des activités ;
- L'ajout des entrées / sorties ;
- L'ajout des contrôles, mécanismes et connectivités entre les diverses activités.

La construction d'un modèle SADT / IDEF0 se fait suivant une analyse descendante ou ascendante du système considéré. Dans le premier cas, il s'agit de partir du niveau le plus haut, représentant le système dans sa globalité (boîte mère) et d'affiner la fonction du système en la décomposant en sous - fonctions. Dans le deuxième cas, il s'agit de partir des activités observées, de les organiser en diagrammes SADT et d'agréger ces activités jusqu'à considérer l'ensemble en une seule activité globale (Figure 1.12).

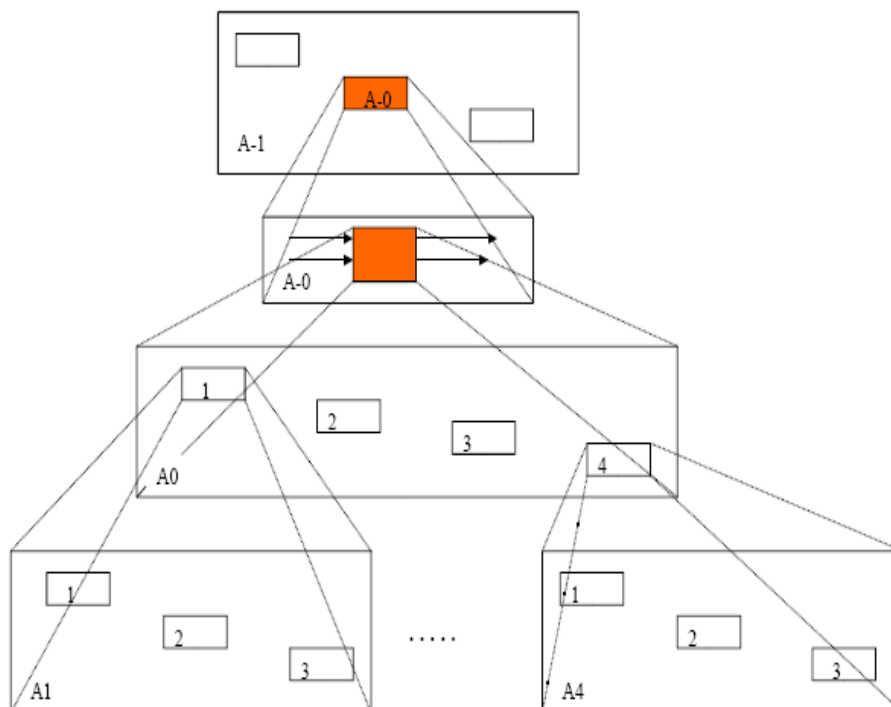


Figure 1.12 : modélisation SADT / IDEF0

La modélisation IDEF3, in [Mayer et al, 1992], comble les manques d'IDEF0 en matière de modélisation des flux de contrôle de l'entreprise [Vernadat, 1999]. IDEF3 permet en effet de saisir et de décrire les processus opérationnels sous la forme d'une succession d'étapes, appelées *unités de comportement* (UDC), connectées par des *boîtes de jonction* (jonction logique « AND »¹², « OR »¹³ et « XOR »¹⁴, convergente ou divergente selon que les flux de contrôle se rejoignent ou se séparent) et des *liens* (liens de précédence, liens relationnels ou flux d'objet). L'ensemble forme un *diagramme de flux de contrôle* du processus. IDEF3 propose ainsi différents niveaux de décomposition du processus, précise la nature des connections entre les activités du processus, différencie le processus de décision des flux d'information et du flux physique. L'usage d'IDEF3, désormais très répandu, permet en définitive de construire une description fonctionnelle des activités mises en œuvre par un système, dépouillées de toute considération sur leurs modalités opératoires. Une telle représentation peut être utilisée à des fins d'analyse économique, par l'évaluation du coût de revient du processus en relation avec le contrôle de gestion [El Mhamedi et al, 1997 b].

5.1.2. GIM

5.1.2.1. Présentation

GIM (GRAI Integrated Modelling) est une méthode d'analyse visant à améliorer les performances des entreprises tant manufacturières que de services [Doumeingts et al, 1993]. GIM se compose d'un modèle conceptuel de référence (le modèle GRAI), de formalismes de représentation (grille et réseaux GRAI, actigrammes et diagramme de classes), d'un cadre de modélisation (principes de vérification de la cohérence) et d'une démarche structurant le tout. La modélisation d'un cas industriel par la méthode GIM est basée sur la constitution d'une équipe projet impliquant les différents acteurs du projet d'amélioration. Dans cette partie dédiée à l'analyse fonctionnelle des systèmes de production, notre intérêt portera spécifiquement sur les outils représentant la partie décisionnelle des systèmes de production, à savoir la grille et les réseaux GRAI.

5.1.2.2. Principes de modélisation

La grille GRAI (Graphes à Résultats et Activités Inter reliées) [Doumeingts, 1984] permet la représentation globale de la partie décisionnelle de l'entreprise, ou système de conduite de la production. Il s'agit d'une représentation matricielle (Figure 1.13) illustrant une double décomposition fonctionnelle (colonnes) et temporelle (lignes). La décomposition fonctionnelle met en évidence les trois fonctions principales de la gestion d'un système de production : gérer les produits, gérer les ressources et planifier les activités. La décomposition temporelle se fait par niveaux « décisionnels » dont chacun est associé à une problématique de planification à plus ou moins long terme. Un couple Horizon / Période caractérise chaque niveau. L'horizon correspond à la durée de la portée de la décision, et la période est l'intervalle de temps au bout duquel les décisions prises sur l'horizon considéré sont remises en cause. Il est d'usage de qualifier de stratégiques, tactiques et opérationnels les niveaux de décision relevant respectivement des long, moyen et court termes. Les décisions sont donc prises périodiquement, mais peuvent aussi être déclenchées sur événement lors d'imprévis

¹² Une jonction de type « AND » indique que tous les flux entrants (ou sortants) de la boîte de jonction doivent être pris en compte.

¹³ Une jonction de type « OR » indique qu'un, plusieurs ou tous les flux entrants (ou sortants) de la boîte de jonctions doivent être pris en compte.

¹⁴ Une jonction de type « XOR » indique qu'un seul flux parmi tous les flux entrants (ou sortants) de la boîte de jonction doit être pris en compte.

d'origine interne ou externe à l'entreprise, pour conférer une indispensable réactivité au système.

Les centres de décision, éléments de base de la grille, se définissent à l'intersection d'une fonction et d'un niveau décisionnel. A chaque centre de décision est implicitement associée une image du système physique, c'est-à-dire une représentation plus ou moins agrégée des activités du système physique, selon le niveau décisionnel. Chaque centre de décision dispose d'un jeu d'informations caractérisant l'état du système à piloter (suivi de production) et d'un cadre de décision (ensemble d'objectifs, variables de décision, contraintes et critères propres à chaque centre de décision) délimitant l'espace des décisions envisageables.

Enfin, les réseaux GRAI sont destinés à la représentation locale de la partie décisionnelle de l'entreprise, en détaillant les processus de décision au sein des centres de décision. L'élément de base des réseaux est l'activité. Il peut s'agir d'activités de décision (choisir) ou d'activités d'exécution (agir).

- Une activité de décision détaille tout le processus d'une prise de décision et implique un ensemble de supports obligatoires à son déroulement : objectifs, variable de décisions, contraintes, critères. Une activité de décision requiert généralement un arbitrage expert entre plusieurs partenaires. Une activité de ce type peut donc donner plusieurs valeurs au résultat pour les mêmes valeurs des entités de départ.
- Une activité d'exécution réalise un traitement procédural d'information (par exemple, un calcul des besoins). C'est en ce sens une activité déterministe.

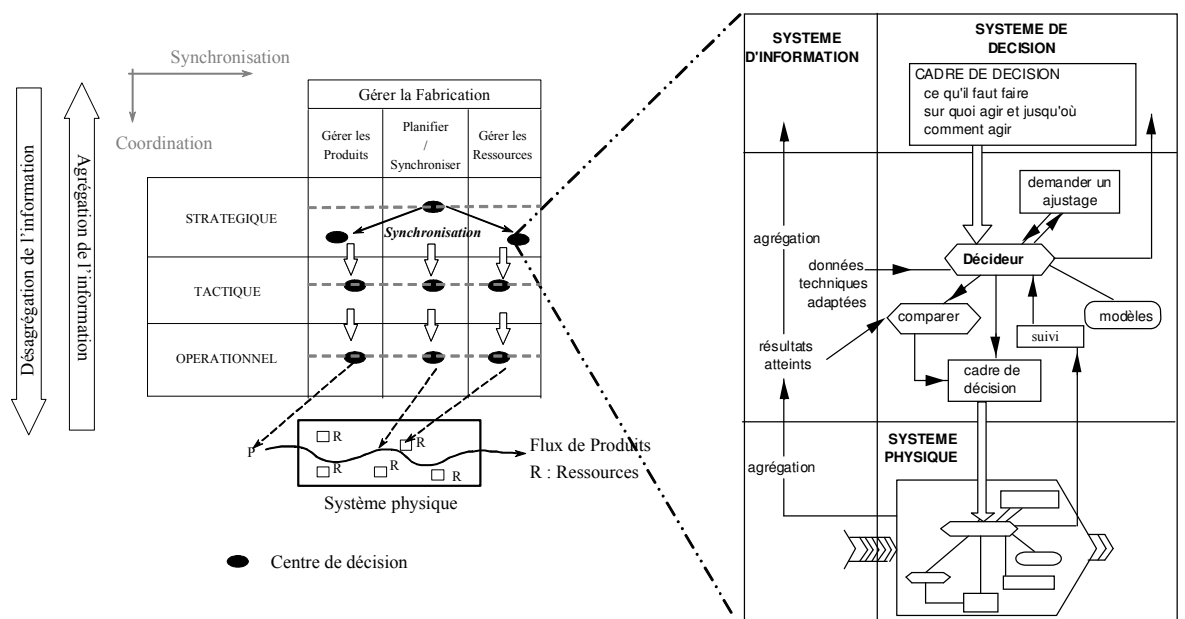


Figure 1.13: Modèles GRAI (grille GRAI globale et réseau GRAI local)

5.1.3. ACNOS

5.1.3.1. Présentation

La méthode ACNOS (ACTivité NON Structurées) [El Mhamedi et al, 1997a] est issue d'un projet de recherche (projet DSPT 8 ACNOS, 1994-1996), financé par le MENESR et mené en

collaboration par différents laboratoires¹⁵. Il s'agit d'une approche multidisciplinaire dont le but est de développer des méthodes et des outils de modélisation et d'intégration des activités et des processus semi ou non structurés des entreprises manufacturières, pour aider à la gestion et à l'amélioration de leurs performances.

5.1.3.2. Principes de modélisation

ACNOS repose sur des outils de modélisation (Réseaux de Petri stochastiques généralisés, IDEF3) permettant de décrire les différentes configurations de l'organisation d'une entreprise. ACNOS est une démarche de modélisation et d'analyse, selon trois phases [Kermad et al, 2001] :

- La délimitation du domaine de l'étude et la formalisation du processus industriel à l'aide de représentations graphiques (IDEF3) ;
- Le passage de la représentation graphique à une représentation plus formelle (réseaux de Petri) et plus opérationnelle, permettant d'analyser, de structurer et d'évaluer les performances du processus modélisé ;
- Les analyses qualitatives (sur la base des modèles graphiques) et quantitatives permettant de détecter des structures particulières de processus (boucles, activités critiques, etc.) et ainsi de déterminer les performances du processus étudié (délais, taux d'engagement des ressources).

5.2. Modélisation organique de l'entreprise

Nous présentons ici les principales approches, qui, selon nous, relèvent de la modélisation organique des systèmes de production et / ou de leurs systèmes de pilotage.

5.2.1. L'approche multi- agents

5.2.1.1. Présentation

L'approche multi agents est fondée sur un principe général d'*individualisation* des systèmes [Ferber, 1995]. Chaque système est décomposé en un ensemble d'entités élémentaires en interaction, les agents¹⁶, possédant chacun ses propres ressources et compétences. Caractérisés par un *état* (description quantitative, qualitative ou symbolique) et des modalités d'*évolution*, ils peuvent interagir simultanément entre eux et / ou avec l'environnement du système. Les agents sont agencés au sein d'une organisation. Celle-ci peut être définie au préalable selon les rôles des agents et les interactions entre ces agents, ou peut émerger au cours du processus et constituer ainsi le résultat d'une évolution du système. Les agents sont capables de contrôler leurs interactions en fonction de leur état et de leurs finalités (Figure 1.14). En effet, lorsqu'un agent perçoit une situation à risque dans son environnement, il tente de la reconnaître. Plusieurs cas sont alors possibles [Côté, 1999] :

- Lorsque la situation lui est familière, il enclenche un processus de planification pour résoudre le problème ;

¹⁵ Le Laboratoire de Recherche en Productique de Strasbourg (LRPS), le Bureau d'Economie Théorique et Appliquée de Strasbourg (BETA), le Laboratoire de Génie Industriel et de Mécanique de Metz (LGIPM) et le Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG).

¹⁶ Le concept d'agent est utilisé dans de nombreux domaines variés tels que l'ingénierie, les systèmes distribués, la robotique, l'intelligence artificielle, la sociologie, etc. En raison des applications diverses, la définition d'un agent varie beaucoup selon le domaine considéré. Nous restreignons ici ce domaine à la gestion de production.

- Lorsqu'il reconnaît la situation en terme d'action, il peut passer à l'exécution de la tâche adaptée à l'action ;
- Lorsqu'il ne peut pas résoudre un problème directement, il engage un processus de coopération afin de demander de l'aide aux autres agents, ce qui implique de nouvelles prises de décision.
- Enfin, lorsque l'agent identifie des situations connues, il peut déclencher directement un comportement directif, passant outre la phase de reconnaissance, pour améliorer sa réactivité.

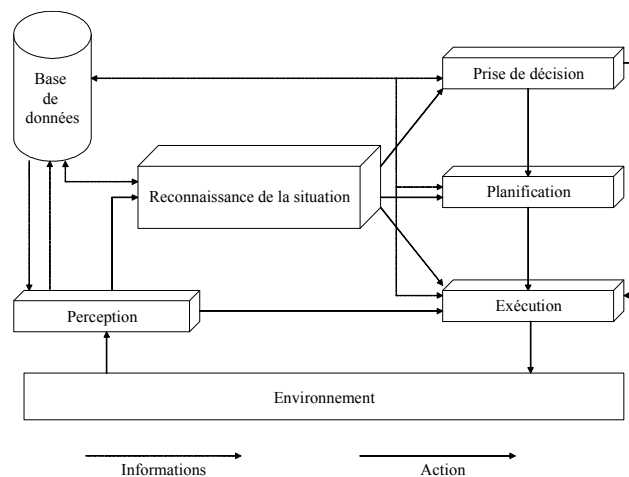


Figure 1.14 : Architecture d'agent [Côté, 1999]

Une telle approche permet d'obtenir une représentation d'un système facilement analysable et simulable pour une aide au pilotage. Par ailleurs, un agent étant autonome et capable de communiquer avec ses semblables, cette approche est couramment associée à des formes hétérarchiques du système de pilotage [Cantamessa, 1997], [Sallez et al, 2004].

5.2.1.2. Principes de modélisation

La démarche de modélisation multi- agents est proche d'une démarche d'analyse systémique. Elle en reprend en effet les bases modulaires (décomposition d'un système en sous-systèmes inter- reliés), mais sur une base d'individualisation qui en définitive est un élément de définition organique du système (Figure 1.15).

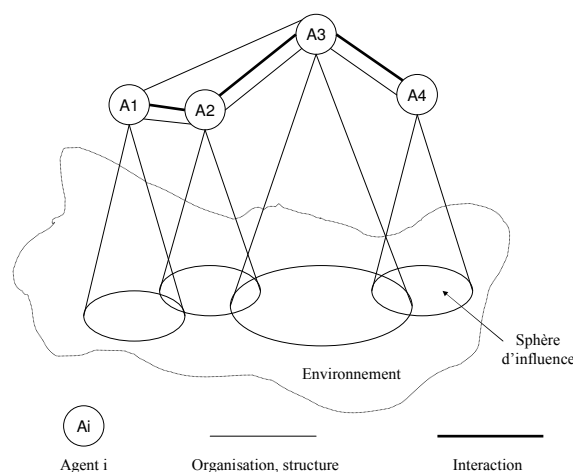


Figure 1.15 : Vue canonique d'un système multi-agent [Wooldridge and Jennings, 2000]

Un système multi-agent se caractérise de la manière suivante [Chaïb-Draa, 1999] :

- Chaque agent possède des informations restreintes et une capacité de résolution de problèmes limitée (vision locale du système) ;
- Il n'y a aucun contrôle global du système multi-agent ;
- Toutes les données sont décentralisées, portées par les agents eux-mêmes ;
- Les agents agissent de façon asynchrone.

Ces primitives de modélisation permettent de représenter l'organisation de pilotage d'un système de production et le comportement interactif des décideurs, y compris les mécanismes de coopérations indispensables pour résoudre d'éventuels conflits et rechercher des solutions dans un espace global à partir d'informations locales. Enfin, la modélisation multi - agents amène à considérer séparément les agents représentant les entités physiques du système de production (pièces, machines, moyens de transport, etc.) et les agents ayant des fonctions spécifiques de pilotage telles que la gestion des stocks ou la gestion des machines composant le système de production [Brinzei et al, 1999].

5.2.2. L'approche holonique

5.2.2.1. Présentation

Les principes de base des systèmes holoniques apparurent dès 1971 [Koestler, 1971]. L'idée est qu'un petit nombre de principes primordiaux suffit pour expliquer la capacité des systèmes sociaux et biologiques à s'autoréguler. Les holons sont les éléments de base de ces systèmes. Le terme holon combine la racine grecque *holos* signifiant « entier » avec le suffixe *-on* voulant dire « partie ». En effet, les holons agissent comme des entités indépendantes autonomes, qui pourtant coopèrent pour former des hiérarchies complexes, qualifiées d'holarchies par Koestler. L'approche holonique diffère de l'approche multi - agent du fait qu'un holon est récursivement décomposable au contraire d'un agent [Coudert, 2000]. Ainsi, une holarchie englobe les architectures de pilotage hiérarchisée, coordonnée et hétérarchique alors qu'une modélisation multi-agent ne couvre que l'architecture hétérarchique [Trentesaux, 2002].

5.2.2.2. Principes de modélisation

Dans le contexte de la modélisation des systèmes de production, un holon représente un module autonome (capable de concevoir et d'exécuter ses propres plans) et coopératif utilisé pour transformer, transporter, stocker ou valider des objets physiques et/ou informationnels [Suda, 1989], [Christensen, 1994]. On trouve dans [McFarlane and Bussmann, 2000] une description générale d'un processus de gestion basé sur les principes holoniques. Un tel processus implique un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un holon ressource, unité indépendante comprenant une ou plusieurs ressources de transformation ou de transport et les systèmes de pilotage associés
- Un holon produit, unité comprenant le produit physique à produire et les supports humains et informatiques nécessaires à la production
- Un holon pilote, unité représentant les besoins d'une commande bien spécifiée, incluant des critères de qualité, délai et prix d'un produit.
- Un holon coordinateur, unité-support optionnelle réalisant une coordination entre les différents holons et assurant que les objectifs globaux du système sont pris en compte.

Une fois créée, chaque holon est capable de raisonnement et de prise de décision locale, et peut interagir avec d'autres holons.

La figure 1.16 présente le scénario simplifié des opérations d'un système de production holonique [Mittmann, 1994]. Dans cet exemple, un « holon informatique » permet à l'utilisateur (client) de négocier les spécifications et la production d'un produit sur mesure (le produit C). Pendant que l'utilisateur spécifie les propriétés du produit C, tous les éléments du système « négocient » leur participation :

- Utilisateur : « Je veux le produit C avec les propriétés X, Y et Z. » (1)
- Holon d'assemblage : « Je pourrais assembler les modules A' et B pour obtenir le produit C. » (2)
- Holon de fabrication : « Je pourrais fabriquer le module A' à partir du module A mais je ne peux pas le livrer au Holon d'assemblage. » (3)
- Holon de transport : « Je pourrais transporter le module A' du Holon de Fabrication au Holon d'assemblage. » (4)

A la fin des négociations, tous les holons sont d'accord pour mettre en œuvre un même plan qui permettra de fabriquer le produit C et de le livrer à l'utilisateur. Ils peuvent alors coopérer pour exécuter le plan, et le renégocient lorsque les circonstances changent (nouvelles spécifications sur le produit C, date de livraison différée, etc.).

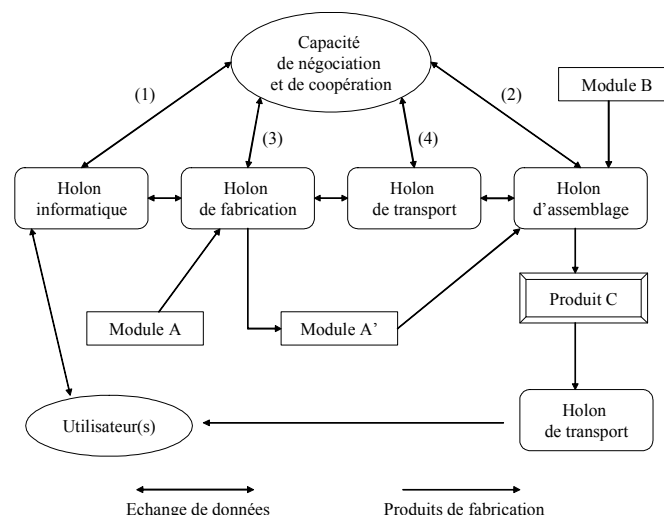


Figure 1.16 : Exemple de système de production holonique [Mittmann, 1994]

5.3. Approches mixtes

Nous regroupons ici les présentations des méthodes de modélisation qui prennent simultanément en compte, et ce explicitement, les aspects fonctionnel et organique du système représenté et / ou du système de pilotage correspondant.

5.3.1. CIMOSA

5.3.1.1. Présentation

CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) est une architecture (ou modèle de référence) permettant l'analyse des systèmes intégrés de production [El Mhamedi, 2002]. Elle a été développée par le Consortium AMICE dans le

cadre de projets ESPRIT¹⁷. Son but est, d'une part, de fournir un support à l'ingénierie d'un système intégré de production et, d'autre part, de participer à l'intégration du système en utilisant le modèle pour piloter les opérations de l'entreprise [AMICE, 1993].

Cette architecture comprend [Vernadat, 1996] :

- Un cadre de modélisation, qui comporte une architecture de référence permettant de construire un modèle générique ainsi qu'une architecture particulière (modèle spécifique à un cas donné) ;
- Une plate-forme d'intégration du système physique et des applications logicielles à partir des différents modèles précédemment définis ;
- Une méthodologie d'intervention, couvrant le cycle de vie du système de production, qui permet d'assurer la cohérence des différents modèles.

5.3.1.2.Principes de modélisation

Le cadre de modélisation (Figure 1.17) se décline suivant trois axes : l'axe de génération, l'axe de dérivation et l'axe de particularisation ou de généricité.

- L'axe de génération définit quatre vues essentielles de modélisation. Il est ainsi possible d'accéder au modèle en se focalisant sur certains aspects et en négligeant les autres, pour une complexité moindre du modèle. Les vues mises en œuvre sont les suivantes : fonction, information, ressources et organisation.
- L'axe de dérivation identifie les différents types de modèles à établir suivant l'étape du cycle de vie : le niveau de définition des besoins, le niveau des spécifications de conception et le niveau de description de l'implantation.
- L'axe de particularisation ou de généricité se compose de trois niveaux (niveau générique, niveau partiel, niveau particulier) permettant au concepteur de définir des modèles spécifiques à chaque étude à partir de modèles de référence.

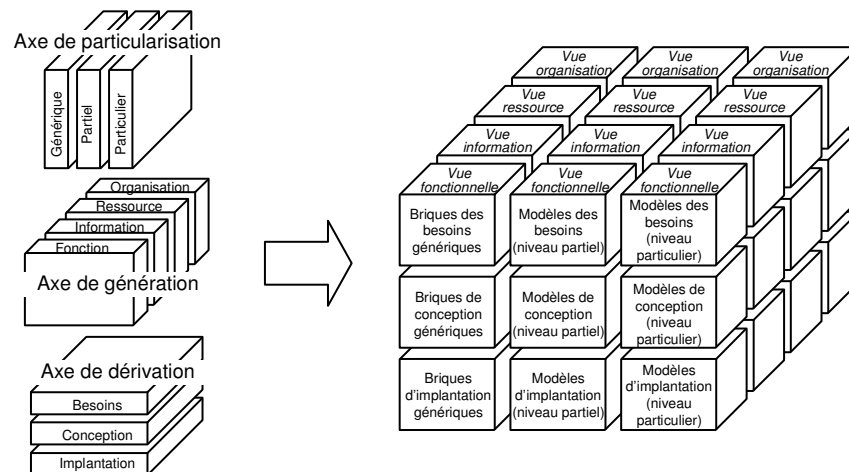


Figure 1.17 : Modélisation CIMOSA

CIMOSA utilise un langage formel de description de la fonctionnalité et du comportement de l'entreprise en termes de processus, d'activités et d'opérations. Nous reconnaissons là un outil de description fonctionnelle. Le comportement de l'entreprise est décrit par un ensemble de

¹⁷ Projets ESPRIT n° 688, 5288 et 7110

domaines formés de processus déclenchés par des événements provenant du système ou de l'environnement. Un processus est formé de sous-processus et des activités qui les constituent.

Par ailleurs, CIMOSA considère la vue organique en décrivant les ressources de l'entreprise nécessaires à l'exécution des processus. Deux types de ressources sont ainsi pris en compte : les ressources passives ou composants, et les ressources actives, douées d'autonomie et pouvant communiquer avec leur environnement. Enfin, les liens entre les différentes ressources sont établis.

5.3.2. PERA

5.3.2.1. Présentation

PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) est une méthodologie complète d'ingénierie des environnements industriels qui peut être généralisée au développement de tout système d'entreprise [Williams, 1992] [Vernadat, 1996]. L'originalité de la méthode est de prendre en compte le rôle des experts, clairement positionnés tant dans l'architecture de pilotage que dans le système physique.

5.3.2.2. Principes de modélisation

L'approche PERA ne propose aucun outil de modélisation ou de spécification, mais justifie le besoin d'une démarche progressive, en définissant cinq phases pour le cycle de vie d'un système industriel [Vernadat, 1999]:

- La phase de conceptualisation, qui comporte deux étapes. La première, l'identification, délimite le domaine d'étude du système industriel considéré (étape (1), Figure 1.18). La deuxième, l'étape de concept, définit la mission et la vision de la direction en termes de politiques concernant les produits et le système opérationnel (2) et la gestion du personnel et de la production (3). Ceci donne naissance à deux branches distinctes dans la méthodologie : l'une pour la partie opérative (équipements) et l'autre pour la partie regroupant toutes les informations liées au traitement des opérations et de leur pilotage¹⁸.

- La phase de définition, ou phase d'analyse fonctionnelle, qui nous intéresse particulièrement ici. Pour chaque partie (opérative et commande), cette phase définit les besoins (4) (5), les tâches à exécuter pour satisfaire ces besoins (6) (7), et fournit des diagrammes de flux (8) (9).

- La phase de conception, composée d'une étape de conception fonctionnelle suivie d'une étape de conception détaillée. La conception fonctionnelle permet d'identifier l'architecture de la partie commande / information (10), les spécifications relatives à l'organisation humaine (11) et l'architecture de la partie opérative (12). A partir de ce stade, les spécifications s'effectueront donc suivant ces trois axes. La conception détaillée complète ainsi l'étape précédente pour la partie information / commande (13), l'organisation humaine (14) et les équipements (15).

- La phase d'installation et de construction, dont le but est d'installer et de tester les bases de données et programmes associés (16), de former le personnel (17) et de transformer les plans et modèles des phases précédentes en une implantation concrète (18) en vue de l'exploitation de l'installation.

- La phase d'opérationnalité et de maintenance, correspondant à l'utilisation concrète (ou exploitation) de l'installation. Au cours de cette phase, la partie information / commande,

¹⁸ Cette séparation apparaît sur le schéma de l'architecture (Figure 1.18).

la partie des tâches humaines ou encore la partie opérative peuvent être remises en cause (maintenance, panne, absence, re-engineering). Il s'agit respectivement des étapes (19), (20) et (21).

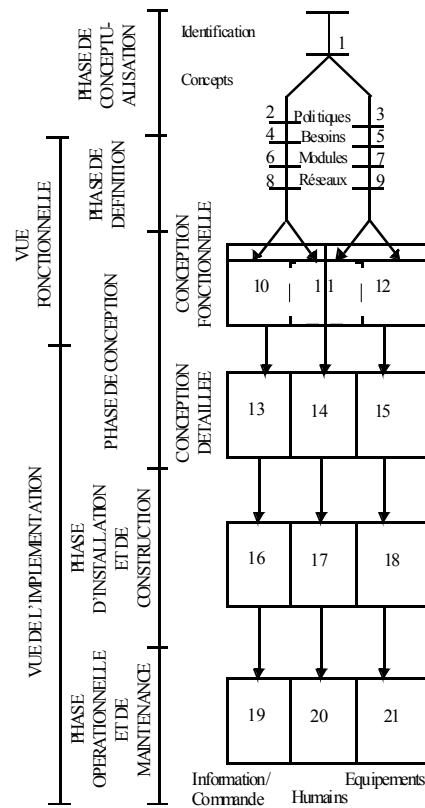


Figure 1.18 : Architecture de modélisation PERA [Vernadat, 1999]

PERA permet de couvrir l'ensemble du cycle de vie d'un système industriel. Tout au long de ce cycle de vie, plusieurs architectures particulières peuvent être identifiées : information, physique et organisation humaine. Toutefois, la méthodologie ne propose pas de modèle de référence qui permettrait d'assurer l'intégration globale de toutes les architectures identifiées sur le cycle de vie.

5.3.3. GERAM

5.3.3.1. Présentation

Issue des travaux du groupe de travail IFAC/IFIP¹⁹ [Williams and Li, 1995], GERAM constitue « une méta - méthode » résultant de la synthèse des concepts de GIM, CIMOSA et PERA. Elle est définie à travers une approche qui fournit un cadre général pour décrire l'ensemble des éléments à prendre en compte lors du processus de conception d'entreprise. Ce cadre se veut suffisamment générique pour couvrir, d'une part, les transformations majeures du genre BPR (Business Process Re-engineering), et, d'autre part, les transformations de faible profondeur dans le cadre d'une amélioration continue²⁰.

¹⁹ IFAC/IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration.

²⁰ Ces deux approches de gestion de l'évolution seront traitées plus en détail chapitre 2, § 3.1.

5.3.3.2.Principes de modélisation

GERAM propose une architecture de référence de l'entreprise. Celle-ci, nommée GERA (Generalised Enterprise Reference Architecture), définit les concepts génériques dont il faut tenir compte dans les projets de conception et d'intégration d'entreprise. Ces concepts peuvent être classés comme suit :

- les concepts relatifs aux ressources humaines, qui définissent le rôle de l'homme comme élément intégré à l'entreprise et ses activités tout au long du processus de conception ou de changement ;
- les concepts relatifs aux processus, qui permettent de décrire et de modéliser les processus d'entreprise ;
- les concepts relatifs à la technologie, qui décrivent les ressources utilisées pour l'exploitation et les projets de changement.

Le cadre de modélisation de GERA est défini pour tout ou partie de l'entreprise (Figure 1.19).

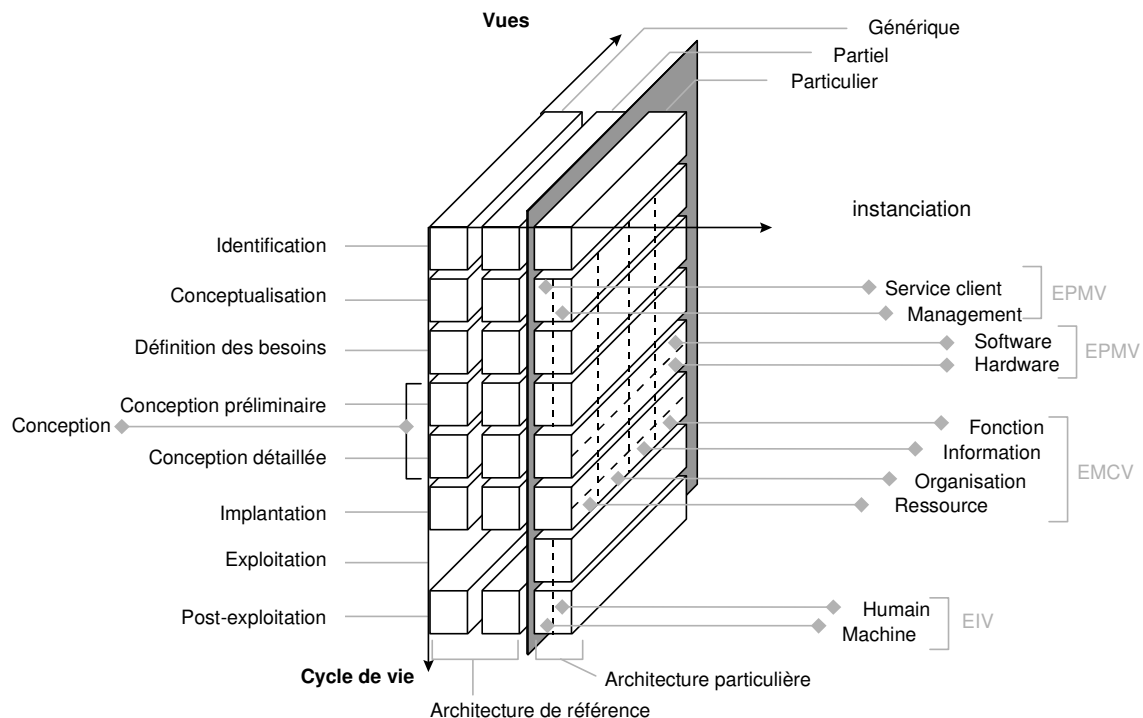


Figure 1.19 - Cadre de modélisation GERA

L'axe cycle de vie comporte 8 niveaux : identification, conceptualisation, définition des besoins, conception préliminaire, conception détaillée, implantation, exploitation et post-exploitation, ce dernier niveau regroupant toutes les activités de réingénierie de tout ou partie de l'entreprise modélisée (évolution du système).

L'axe d'instanciation définit les paradigmes d'architecture et de modèles de référence des systèmes de production. Trois niveaux sont définis : générique, partiel et particulier. Les deux premiers types de modèles constituent les architectures de référence alors que le dernier identifie les architectures particulières (cf. CIMOSA, § 5.3.1).

L'axe des vues permet de considérer toute partie de l'entreprise selon quatre types de vues :

- *Entity Model Contents View (EMCV)* : partie fonction, information, organisation, ou ressource ;
- *Entity Purpose View (EPV)* : partie dédiée au processus de production proprement dit, ou relative aux activités liées au management de ce processus ;
- *Entity Implementation View (EIV)* : partie regroupant les informations relevant d'une activité humaine, ou identifiant les activités automatisées ;
- *Entity Physical Manifestation View (EPMV)* : partie matériel (hardware) ou programme (software).

GERAM présente donc un cadre de modélisation très complet qui distingue la partie opérative de la partie décisionnelle, tout en détaillant le cycle de vie de tout ou partie de l'entreprise. Cependant, aucune démarche d'aide à la modélisation n'est proposée.

5.3.4. IEM

5.3.4.1. Présentation

IEM (Integrated Enterprise Modelling) est une méthode de modélisation en entreprise se focalisant sur les aspects fonctionnels et informationnels de l'entreprise [Spur et al, 1996]. IEM reprend quelques concepts de IDEF0 et des règles de comportement de CIMOSA.

5.3.4.2. Principes de modélisation

Les aspects fonctionnels sont représentés grâce à un élément de base permettant de décrire les activités et processus: le modèle d'activité générique (Figure 1.20). La principale différence par rapport à IDEF0 est que les entrées et sorties d'une activité sont des états d'objets issus de trois classes : Commande, Produit et Ressource. La classe Produit prend en compte tout objet représentant un produit final pour l'entreprise. La classe Commande représente l'information nécessaire pour le pilotage dans l'entreprise. La classe Ressource prend en compte tout objet technique, humain ou informationnel intervenant dans la réalisation d'un travail dans l'entreprise. Il y a trois niveaux de description pour une activité. Une activité est en premier lieu définie comme une action, description d'un travail ou d'un processus, lui-même défini comme un ensemble d'étapes. A ce niveau global de description, les entrées/sorties de l'activité ne sont pas spécifiées. Une action se spécialise ensuite en fonction. Enfin, une fonction devient une *activité complète* quand ses entrées de contrôle et les mécanismes supports à l'activité sont respectivement définis par des objets de la classe Commande et de la classe Ressource.

Les activités sont reliées grâce à des opérateurs de concaténation, formant ainsi des chaînes d'activité (processus). Il peut s'agir d'une concaténation séquentielle, parallèle, alternative, ou encore d'un regroupement d'activités.

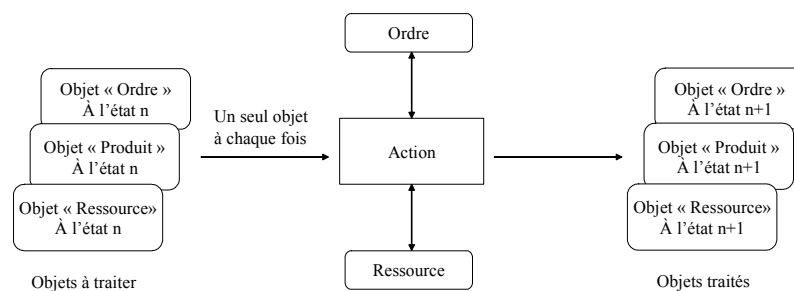


Figure 1.20 : Modèle d'activité générique d'IEM

5.3.5. MECI

5.3.5.1. Présentation

La méthode MECI (Modélisation d'Entreprise pour la Conception Intégrée) [Pourcel et Gourc, 2002] résulte du projet AICOSCOP (Aide à la Conception des Systèmes de Conduite de Production), financé par le MRT, qui avait pour objectif de concevoir et de développer une méthode d'aide à la conception des systèmes de production [Pourcel, 1994]. MECI constitue une aide pour analyser le fonctionnement de tout ou partie d'un système, détecter ses dysfonctionnements, concevoir une organisation et une structure de système technique, et valider une conception ou une reconception de ce système.

5.3.5.2. Principes de modélisation

La démarche comprend trois phases : initialisation et organisation (recueil des informations générales, organisation du projet, rédaction du cahier des charges), modélisation proprement dite (analyse descendante, validation du modèle, rédaction du bilan de la modélisation), utilisation ou exploitation du modèle. La méthode MECI permet d'analyser les points de vue de flux, de fonction, de décision, d'organisation et de dynamique.

Le point de vue fonctionnel est analysé sur la base du méta modèle TCAA (Tâche – Compétences- Acteurs (ou ressources) – Activités (ou processus)) (Figure 1.21). La tâche spécifie une transformation que doit subir l'objet. Une tâche, pour être exécutée, nécessite des compétences (savoir, savoir-faire, savoir être, professionnalisme), fournies par un ou plusieurs acteurs ou ressources. Une ressource peut être humaine (opérateur, décideur, etc.), technique (machine, outillage, logiciel, etc.) ou naturelle (eau, gaz, etc.). Dans tous les cas, il faut au moins une ressource humaine pour former un acteur. Une activité consiste en la réalisation concrète d'une tâche par un acteur. La performance de cette activité dépend alors de l'adéquation entre les compétences requises et les compétences fournies.

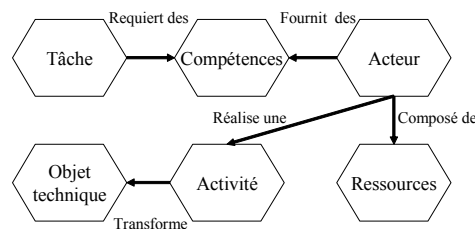


Figure 1.21 : Méta modèle TCAA de la méthode MECI

Le point de vue flux rend compte des liens entre les activités (ou les processus) et permet ainsi de construire l'organigramme fonctionnel et décisionnel du système étudié. La typologie des flux distingue les flux matière, les flux d'énergie et les flux informationnels. Un flux est caractérisé par l'activité ou le processus émetteur, le contenu du lot ou du message, et l'activité ou le processus récepteur. Le point de vue dynamique met en évidence le pilotage des activités et des processus en considérant qu'une tâche ne peut être réalisée que si des pré conditions sont satisfaites, et qu'elle n'est terminée que si des post conditions sont satisfaites.

Le point de vue décisionnel considère la nature des décisions, le niveau de décision et la situation de l'activité par rapport à la décision. Les décisions sont de deux types : les décisions de conception ou d'ingénierie (décisions horizontales) et les décisions de pilotage ou de management (décisions verticales). Il existe plusieurs approches pour identifier le niveau de la décision. Il peut s'agir d'une approche classique prenant en compte les niveaux stratégique, tactique et opérationnel, d'une approche illustrant le comportement du système (auto organisation, adaptation, optimisation, régulation), etc.

Le point de vue organisationnel définit les composants de l'organisation, constitués d'un processus opérant, d'un processus de conduite et d'un système d'information. Un composant d'organisation a pour mission de « *transformer une collection d'objets techniques (tangibles ou symboliques) appelés intrants en une collection d'objets techniques appelés extrants transformés suivant un programme et dans le cadre d'objectifs et de contraintes fixés par son environnement. Cette transformation est réalisée par un ensemble de ressources qui lui sont affectées. Il doit émettre un compte-rendu d'activités à son environnement* ».

6. CONCLUSION

L'offre en outils de modélisation d'entreprise dans la littérature est relativement importante. Le degré d'abstraction souvent élevé de ces descriptions rend parfois difficile leur classification. Nous avons toutefois analysé les outils les plus connus en distinguant les approches de modélisation à dominante fonctionnelle ou organique, ainsi que plusieurs méthodes permettant de prendre en compte conjointement ces deux points de vue. Nous dressons maintenant un bilan permettant de comparer les trois modélisations fonctionnelle, organique et mixte. Pour ce faire :

- Le tableau 1.2 considère les critères visant à jauger la généralité du modèle eu égard à la diversité des cas, et l'existence d'un cadre et de formalismes de représentation ;
- Le tableau 1.3 considère les vues traitées à travers chaque approche (vues fonction, décision, organisation, information, ressource, aspects humains) ;
- Le tableau 1.4 considère l'applicabilité des modèles dans le cycle de vie du système.

Le premier constat ici fait est que les approches fonctionnelle et organique partagent certaines caractéristiques communes :

- Une approche de modélisation systémique (décomposition modulaire) ;
- Un cadre de modélisation basé sur le cycle de vie d'un système ;
- La notion de système piloté / pilotant ;
- Le concept d'autonomie locale.

Cependant, elles diffèrent par certains aspects :

- Formalisme qualitatif vs quantitatif décrivant les objectifs, activités, processus;
- Contexte et but de la modélisation (conception vs exploitation).

Au total, peu de méthodes de modélisation proposent une approche prenant en compte simultanément les aspects fonctionnel et organique des systèmes. Les approches qui prennent en compte les deux aspects n'explicitent pas les vues fonctionnelle et organique, ni le lien permettant de passer d'une vue à l'autre. On remarque aussi que le contexte d'utilisation des modèles (quelle est la problématique de réingénierie justifiant l'analyse) reste le plus souvent peu explicite. Enfin, peu de méthodes de modélisation proposent une modélisation couvrant la totalité du cycle de vie des systèmes : concepts génériques, définition des besoins, conception, instanciation, exploitation. En conséquence, nous proposons d'analyser dans le chapitre 2 les méthodologies existantes de gestion d'évolution des systèmes de production, afin de clarifier l'usage de modèles dans les projets de réingénierie des systèmes modélisés.

		SADT / IDEFO	GRAI / GIM	ACNOS	PERA	Approche holonique	Approche multi- agents	CIMOSA	GERAM	IEM	MECI
Type du système	Manufacturier	o	o	o	o	o	o	o		o	o
	services	o	o	n	n	o	o	n		n	o
Prise en compte de liens	hiérarchiques	o	o	o	o	o	o	o		o	o
	coopératifs	n	n	n	n	o	o	o		n	n
Modèle de référence		o	o	o	n	o	o	o		o	o
Cadre de modélisation		o	o	o	o	o	o	o		o	o
Formalisme de représentation	Qualitatif	o	o	o	o	n	n	o		o	o
	Quantitatif	n	n	o	n	o	o	n		o/n	n

Tableau 1.2 : Comparatif des méthodes de modélisation des systèmes de production

o : la méthode répond au critère n : la méthode ne répond pas au critère o/n : la méthode répond en partie au critère

	SADT / IDEF0	GRAI / GIM	ACNOS	PERA	Approche holonique	Approche multi- agents	CIMOSA	GERAM	IEM	MECI
Vue fonction	o	o	o	o	n	n	o		o	o
Vue décision	n	o		n	o	o	n		n	o
Vue organisation	n	o/n		n	o	o	o		o/n	o
Vue information	o/n	o		n			o		o	n
Vue ressource	o/n	n		n	o	o	o		o	o/n
Vue aspects humains	n	o/n	o	o			o/n		o/n	o

Tableau 1.3 : Comparatif des vues traitées dans chaque méthode de modélisation des systèmes de production

o : la méthode répond au critère n : la méthode ne répond pas au critère o/n : la méthode répond en partie au critère

	SADT / IDEF0	GRAI / GIM	ACNOS	PERA	Approche holonique	Approche multi- agents	CIMOSA	GERAM	IEM	MECI
Identification		n		o			n		n	
Concepts		n		o			n		n	
Besoins	o	o		o			o		o	
Conception	o/n	o		o			o		o	
Implémentation	n	o		o			o		o	
Exploitation				o	o	o	o			
Evolution				o	o	o	o			

Tableau 1.4 : Couverture du cycle de vie par les méthodes de modélisation d'entreprise, adapté de [Kosanke, 1996]

o : la méthode répond au critère n : la méthode ne répond pas au critère o/n : la méthode répond en partie au critère

²¹ Le cycle de vie servant ici de référence est celui proposé par la méthodologie GERAM (Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodologies Framework).

Chapitre

2

MODELISATION EVOLUTIONNISTE DES
SYSTEMES DE PRODUCTION

Sommaire Chapitre 2

Modélisation évolutionniste des systèmes de production

1. INTRODUCTION	58
2. DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION	58
2.1. Introduction	58
2.2. Les types comportementaux	59
2.3. Evénements et analyse de criticité	61
2.4. Impact de l'évolution	62
2.5. Pilotage ou gestion de l'évolution	62
3. MODELISATION EVOLUTIONNISTE	63
3.1. Approches génériques pour la gestion de l'évolution des systèmes de production	63
3.1.1. Le reengineering	63
3.1.2. L'évolution continue	64
3.2. Méthodes spécifiques de gestion de l'évolution d'un système de production	65
3.2.1. La méthode GEM	65
3.2.2. Le projet RÉSIPROQ	67
3.2.3. La méthode PETRA	68
3.3. Cycle de vie du système et du produit	69
3.3.1. Echelle de valeur des artefacts	69
3.3.2. Cycle de vue du système	70
3.3.3. Cycle de vie du produit	71
3.3.4. Synthèse	73
4. CONCLUSION	74

1. INTRODUCTION

L'entreprise est une organisation qui, entre autres fonctions, a en charge la conception et la réalisation de produits, le « produit » étant à prendre au sens de ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur pour répondre à son besoin [AFNOR, 1990]. Dans le cadre de cette thèse, il n'est toutefois question que de production manufacturière. Dans un tel contexte, la conception de produits est l'activité créatrice qui, partant des besoins exprimés par le marché et des connaissances existantes, aboutit à la définition des produits physiques satisfaisant ces besoins industriellement réalisables [AFNOR, 1988]. L'organisation de moyens techniques et humains mobilisée pour la réalisation des activités de conception de produits peut légitimement être qualifiée de système de conception de produits [Girard, 1999]. La production est quant à elle l'ensemble des activités aboutissant à la réalisation matérielle et collective des produits. Enfin, le système de production est l'organisation des moyens techniques et humains mobilisée par la production.

Naturellement, les choix organisationnels et techniques de l'entreprise sont fortement influencés par l'environnement (économique, commercial, technologique, normatif, législatif, etc.) de celle-ci, puisque la fonction externe de l'entreprise est définie par rapport à son environnement (chapitre 1, § 3.2). Dans le contexte de forte variabilité environnementale que connaissent aujourd'hui les entreprises, la *gestion de l'évolution* apparaît comme un niveau supplémentaire de pilotage assurant le maintien de la fonction externe de l'entreprise par une révision plus ou moins profonde de ses données techniques et de son organisation : concevoir de nouveaux produits et reconcevoir le système de production (ré-ingénierie) constituent les deux principales variables d'action de la gestion de l'évolution.

L'objet de ce chapitre est de rapprocher les problématiques connexes à la gestion de l'évolution des systèmes de production (criticité d'événements, réactivité, flexibilité, adaptabilité) et de présenter les méthodologies existantes de gestion d'évolution de ces systèmes. Nous caractériserons ensuite le cycle de vie du système de production du point de vue de l'impact de l'évolution sur la définition fonctionnelle et / ou organique de ce système. Par cette synthèse, nous établirons enfin le lien entre les concepts et outils de modélisation (chapitre 1) et leur utilisation en ré-ingénierie (chapitres 3 et 4).

2. DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

2.1. Introduction

Le comportement dans le temps d'un système de production ne déroge pas aux principes de la systémique. Nous mettons en avant deux notions :

- D'une part, la dynamique d'un système est conditionnée par les interactions entre le système et son environnement. Nous ferons à ce sujet référence à [Lemoigne, 1994]. Il faut en particulier considérer les stimuli engendrés par l'environnement sur le système, et il convient d'en caractériser la criticité. Cependant, les événements critiques peuvent également être d'origine interne. Dès lors, nous qualifierons de perturbation tout événement d'origine exogène ou endogène susceptible d'impacter la dynamique du système.

- D'autre part, la notion d'évolution est inséparable de l'échelle de temps utilisée pour observer le système, étant entendu qu'une caractéristique considérée invariante sur le court terme est susceptible d'évoluer significativement sur un plus long terme. Le distinguo paramètre / variable illustre classiquement cette relativité. Pour certains auteurs d'ailleurs, le

terme de dynamique est réservé pour qualifier l'évolution structurelle (ou transformation) du système : « *Tout modèle de système comporte a priori deux parties : une cinématique, dont l'objet est de paramétrer les formes ou les états du processus considéré, et une dynamique, dont l'objet est de décrire l'évolution temporelle entre ces formes* » [Thom, 1972].

2.2. Les types comportementaux

Le comportement dynamique d'un système de production est classiquement décrit par les notions de flexibilité et de réactivité. La flexibilité s'entend comme « *la capacité d'un système industriel à créer ou gérer de la variété, de façon économique et continue, afin de s'adapter aux perturbations, externes ou internes, tout en maintenant son équilibre* » [Okongwu, 1990]. Nous rappelons que nous retiendrons nous-même le terme de perturbation pour désigner un événement interne ou externe susceptible de justifier une modification du système.

La réactivité²² caractérise la capacité d'un système de pilotage à prendre en compte les perturbations [Neubert, 1997]. C'est « *une performance fortement liée à la mesure de l'efficacité qui ne tient pas compte des moyens mis en œuvre* » [Trentesaux, 2002]. Si l'on interprète ces points de vue en référence aux vues fonctionnelle et organique du système de production, nous retiendrons que la réactivité qualifie la capacité de régulation fonctionnelle du système, alors que la flexibilité traduit sa capacité d'adaptation fonctionnelle. La réactivité s'applique à tous les domaines : en conception pour suivre, voire précéder le marché et intégrer les innovations technologiques ; en production, pour synchroniser les commandes et optimiser leur délai de réalisation grâce aux techniques d'ordonnancement [Di Mascolo et al, 2000], [Sadfi, 2002] ; en logistique, pour synchroniser les approvisionnements aux lancements de production [Clivillé, 2004].

Par ailleurs, Mélése identifie quatre « modes » comportementaux pour un système [Mélése, 1979] :

- *L'efficience stationnaire : rendement de la machine entreprise dans un environnement stable où les produits, les marchés, les moyens et les budgets sont connus ;*
- *L'adaptabilité opérationnelle : capacité de répondre à des changements de niveaux de diverses variables (demande, production) ;*
- *L'adaptabilité stratégique : capacité de répondre à des changements de nature de ces variables (produits nouveaux, technologies nouvelles) ;*
- *L'adaptabilité structurelle : capacité du système à modifier sa structure pour répondre à des changements structurels de l'environnement.*

Ainsi, si nous considérons les fonctions externes du système par rapport à son environnement, et donc corrélativement la nature des interactions en présence, nous pouvons classer différents types comportementaux selon la variabilité des relations système / environnement et des fonctions exercées par le système vis-à-vis de son environnement (Tableau 2.1).

²² On trouve une enquête sur la réactivité dans les entreprises, in [Tournesol, 2001].

Fonctions externes du système de production

		Fonctions invariantes	Fonctions changeantes
Relations du système de production avec son environnement	Relations permanentes	<p>REGULATION</p> <p>Les fonctions du système et les relations qu'il entretient avec son environnement sont permanentes, c'est-à-dire qu'elles sont clairement définies et stables au cours du temps (par exemple, un sous-traitant d'un grand donneur d'ordre au sein d'une entreprise étendue). L'organisation ou définition organique du système est elle-même invariante. Il s'agit d'un contexte à faible variabilité extérieure, et la régulation consiste à maintenir la fonction économique²³ de l'entreprise en surveillant les facteurs caractéristiques (coûts, qualité, délais) de cette fonction.</p>	<p>PREACTIVITE ET PROACTIVITE</p> <p>Les relations entre le système et son environnement sont stables, et le système prend l'initiative de changer les fonctions qu'il doit réaliser. Il doit modifier et ajuster sa structure organique en conséquence. Le changement de fonctions apparaît ici pour anticiper l'apparition d'aléas ou de dysfonctionnements. On parle alors de préactivité en ce qui concerne la préparation à un changement prévisible, et de proactivité comme une action générée en vue de provoquer un changement souhaité [Godet, 1991] (par exemple l'investissement dans de nouvelles technologies afin de lancer un produit innovant, et rester compétitif).</p>
	Relations Changeantes	<p>ADAPTATION</p> <p>Les relations du système avec son environnement sont changeantes : il y a apparition de perturbations. L'incidence de ces perturbations est modérée, c'est-à-dire que ces dernières n'ont pas d'impact sur la définition organique du système ou qu'elles modifient la structure sans toutefois remettre en cause les fonctions à réaliser (retard de livraison, modification des gammes de fabrication, etc.).</p>	<p>EVOLUTION</p> <p>Les relations du système avec son environnement sont changeantes. Il y a des perturbations, et l'amplitude du changement effectué par ces perturbations est forte : les fonctions évoluent au cours du temps suivant la concurrence, la stratégie marketing adoptée par l'entreprise, les variations des demandes clients, etc. Le système doit donc évoluer et adapter sa définition organique aux nouvelles fonctions à réaliser (un cas caractéristique est une diminution sévère de la production face à une demande en régression et une concurrence exacerbée).</p>

Tableau 2.1 – Typologie comportementale d'un système de production, inspiré de [Lemoigne, 1977]

²³ La fonction économique d'une entreprise est l'action attendue de l'entreprise ou réalisée par elle (objectifs prédéfinis) pour répondre au besoin d'un client donné (voir § 3.3).

2.3. Événements et analyse de criticité

Toute évolution au sein d'un système de production est intimement liée à la notion de perturbation. Une perturbation est « *un événement imprévu conduisant à la rupture du fonctionnement en mode nominal d'un processus d'entreprise* », et peut être d'origine interne ou externe au système. Une perturbation peut être caractérisée selon quatre critères [Megartsi et Cauvin, 2001] :

- la gravité (évaluant l'importance de l'impact de la perturbation sur le système) ;
- la causalité (renseignant sur la nature de la cause de la perturbation) ;
- la prévisibilité (indiquant la capacité à prévoir une occurrence de la perturbation) ;
- la maîtrise (capacité du système de conduite à faire face à la perturbation).

Pour pouvoir évoluer et s'adapter aux modifications environnementales, une entreprise doit donc prévenir l'arrivée de perturbations par une veille stratégique. Celle-ci peut-être définie comme le moyen pour l'entreprise de scruter efficacement son environnement en vue de mieux s'adapter aux changements de celui-ci et d'être durablement compétitive [Lesca, 1994]. Pour autant, l'activité de veille ne doit pas se concentrer seulement sur l'externe, mais aussi sur l'interne. Des mouvements incontrôlables surgissent en effet au sein même de l'entreprise, pouvant endommager ses capacités [Gueguen, 1997].

L'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est couramment employée en cas de perturbation du mode nominal d'un processus d'entreprise. Il s'agit avant tout d'une méthode d'analyse s'appuyant sur un raisonnement inductif [Courtois et al, 1995] [Landy, 2002] [Faucher, 2004]. Les effets des modes de défaillance d'une entité donnée sont étudiés en premier lieu sur les composants directement interfacés avec celle-ci (effet local), puis de proche en proche (effet de zone) vers le système et son environnement (effet global). La cotation des défaillances est effectuée par une évaluation de la criticité ou indice de priorité des traitements qu'elles peuvent nécessiter. Afin de déterminer cet indice de priorité, il faut définir (Figure 2.1) :

- L'échelle de probabilité d'occurrence (O) de la défaillance ;
- L'échelle de gravité (G) ou évaluation de l'effet nocif induit par la défaillance ;
- L'échelle de non - détection (D) ou probabilité de ne pas détecter une défaillance.

L'indice de priorité (IP) est alors égal à :

$$IP = G \text{ (gravité)} \cdot O \text{ (occurrence)} \cdot D \text{ (non - détection)}$$

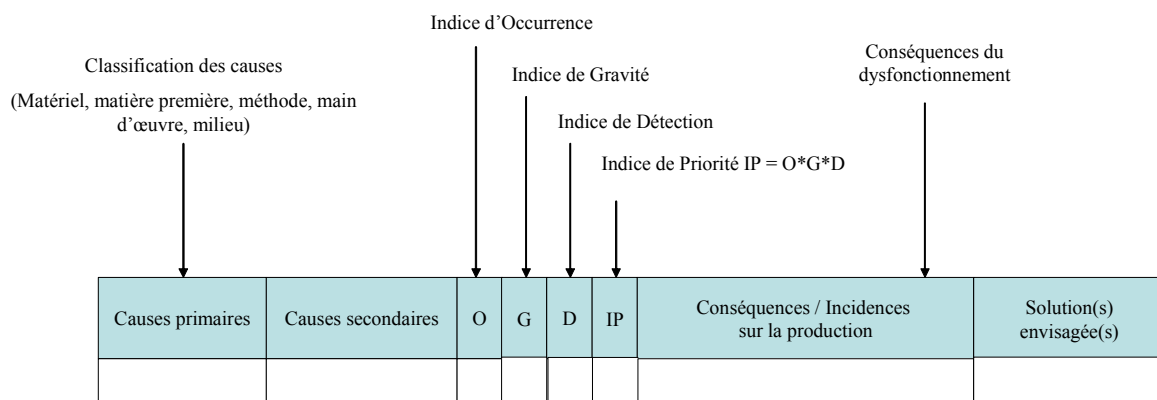


Figure 2.1 – Tableau AMDEC

Les défaillances dont l'indice de priorité est supérieur à une valeur prédéterminée (seuil de criticité) nécessitent le déclenchement d'actions correctives.

2.4. Impact de l'évolution

L'impact de l'évolution d'un système de production peut s'évaluer en amplitude et en fréquence. L'amplitude du changement caractérise la manière dont les changements liés à l'évolution du système affectent la réalité de ce système [Grouard et Meston, 1993], [Malhéné, 2000]. La fréquence ou rythme de l'évolution est à l'évidence d'autant plus faible que l'amplitude du changement est importante.

Dans [Bartoli et Hermel, 1986], trois types d'évolution ou changement sont mis en évidence :

- *Le changement ponctuel*, mineur en terme d'espace et de durabilité ;
- *Le changement majeur*, à incidence durable sur les court et moyen termes ;
- *Le changement permanent*.

Tenant compte de ces propositions, nous caractérisons l'amplitude de l'évolution d'un système de production selon son impact sur la définition organique ou sur la définition fonctionnelle du système²⁴. L'amplitude de l'évolution du système est qualifiée de :

- Faible si le changement effectué impacte faiblement la structure du système. Il s'agira par exemple simplement d'une modification d'une gamme de fabrication.
- Moyenne si le changement effectué modifie la définition organique du système, sans toutefois modifier les fonctions qu'il réalise. Il s'agira par exemple du remplacement d'une machine au sein d'un atelier.
- Forte si le changement effectué nécessite des ajustements fonctionnels. Il s'agira par exemple de la migration du métier de l'entreprise, rendue nécessaire par le maintien d'une position économique dans un marché lui-même en évolution.
- Fatale si le changement effectué rend la fonction économique du système obsolète et mène à un démantèlement ou à une reconception complète de celui-ci, consécutive par exemple à l'irruption de nouvelles normes menant à une interdiction de commercialiser le produit.

2.5. Pilotage ou gestion de l'évolution

Le pilotage de l'évolution d'une entreprise consiste à réorganiser tout ou partie de cette entreprise. La réorganisation est identifiée à la procédure de changement de l'état de l'entreprise, les changements pouvant concerner tout autant le système physique, la structure, la circulation des flux, les compétences humaines, etc. [Berrah et al, 2001]. L'amplitude de l'évolution d'un système de production est ainsi caractérisée selon son impact sur les définitions organique et / ou fonctionnelle du système, qui correspondent à des projets de ré-ingénierie à moyen et long termes. Toutefois, de nombreux changements sont associés à des projets de ré-ingénierie à court terme qui n'affectent ni la structure ni les fonctionnalités du système.

L'organisation de l'entreprise repose sur deux parties, à savoir la structure et le

²⁴ Une méthode d'évaluation de l'impact des évolutions du produit sur le système de production et la performance de l'entreprise est par ailleurs proposée dans [Collaine, 2001].

fonctionnement ou l'exploitation de celle-ci. La structure, comme nous l'avons vu au premier chapitre, identifie la partie statique de l'organisation et concerne la méthode de répartition de travail, les entités (postes, unités, services, départements, divisions), les liens entre les entités, la répartition des autorités et des responsabilités, les mécanismes de coordination, l'organigramme. La seconde partie concerne la partie dynamique de l'organisation. Elle porte sur les flux d'autorité, les flux d'information, le système de communication, le système de travail (processus opérationnels), le système de processus de décision [Mintzberg, 1994]. Les changements associés à des projets de ré-ingénierie à court terme affectent le côté dynamique de l'organisation, c'est-à-dire le fonctionnement ou l'exploitation de celle-ci. En plus des aspects organiques et fonctionnels de l'entreprise pris en compte respectivement en ré-ingénierie à moyen et long termes, il faut donc considérer une vue détaillée des modes opératoires qui permettrait aux analystes de les guider dans des projets à moindre échéance. Cette vue, dite opérationnelle, décrit dans le cadre d'une structure « stable » du système industriel les processus et modes opératoires mis en œuvre, et concourt directement aux activités réalisées dans l'entreprise.

Ces vingt dernières années, les phénomènes de mutation à court ou à long terme ont suscité un intérêt grandissant dans de nombreuses communautés scientifiques. Notamment, les algorithmes évolutionnistes, inspirés des mécanismes génétiques d'évolution, constituent une famille de méthodes d'optimisation dont on trouve une revue dans [Paris et al, 2003]. Les modèles utilisés prennent désormais en compte un grand nombre de problèmes d'optimisation multicritère sous contraintes. Cependant, les algorithmes évolutionnistes nécessitent une caractérisation formelle du système ou du processus sujet à une évolution (ce qui pour le moment limite leur utilisation à la résolution de problèmes ponctuels, notamment, l'application aux problèmes d'ordonnancement [Portmann et al, 1998]), et cette approche conceptuellement séduisante ne nous semble pas applicable à l'analyse de l'évolution d'une entreprise dans sa globalité. En conséquence, le paragraphe suivant analyse différentes approches pour la gestion de l'évolution, développées dans le contexte propre à l'ingénierie des systèmes de production.

3. MODELISATION EVOLUTIONNISTE

Nous abordons ici tout d'abord les deux méthodes principales que sont le reengineering et l'évolution continue, puis présentons des approches spécifiques développées au travers de quelques projets d'envergure. Sur la base de ces éléments d'état de l'art, nous ferons enfin notre propre synthèse en reliant les dynamiques concomitantes d'évolution (cycles de vie) du système et du produit au référentiel mis en avant au chapitre 1 (aspects fonctionnel et organique).

3.1. Approches génériques pour la gestion de l'évolution des systèmes de production

3.1.1. Le reengineering

Né des méthodologies BPR (Business Process Reengineering ou refonte des « processus métiers »), le reengineering consiste en « *une remise en cause fondamentale et une redéfinition radicale des processus opérationnels pour obtenir des gains spectaculaires dans les performances critiques que constituent aujourd'hui les coûts, le service, la qualité et la rapidité* » [Hammer et Champy, 1996]. Il y a *a priori* trois « catégories » d'entreprises ayant recours au reengineering :

- Celles qui ont de graves difficultés ;

- Celles qui n'ont pas encore de problèmes mais dont les dirigeants anticipent les difficultés ;
- Celles qui n'ont aucune difficulté majeure mais dont les dirigeants cherchent à accroître les avantages concurrentiels.

Le reengineering semble ainsi particulièrement adapté au cas d'un marché, qui, s'il n'est pas stable, reste prévisible [Jacob, 1996]. La reconfiguration de l'entreprise s'effectue sur des horizons longs, permettant aux décideurs d'établir des prévisions fiables. Il importe de comprendre que le reengineering ne s'intéresse pas à l'organisation proprement dite d'une entreprise, mais aux processus opérationnels de celle-ci. Les changements opérés sur les processus sont importants, souvent longs et coûteux. Les premiers processus opérationnels visés sont ceux dont les dirigeants savent déjà qu'ils posent un problème technique grevant la productivité. Viennent ensuite ceux ayant un impact sur les clients de la société, puis ceux susceptibles d'engendrer des parts de marché. Au fur et à mesure de la réalisation des projets de reengineering, les performances de l'entreprise se trouvent rehaussées de manière discontinue (Figure 2.2), permettant à l'entreprise de s'efforcer de poursuivre une trajectoire idéale de performance [Malhéné, 2000].

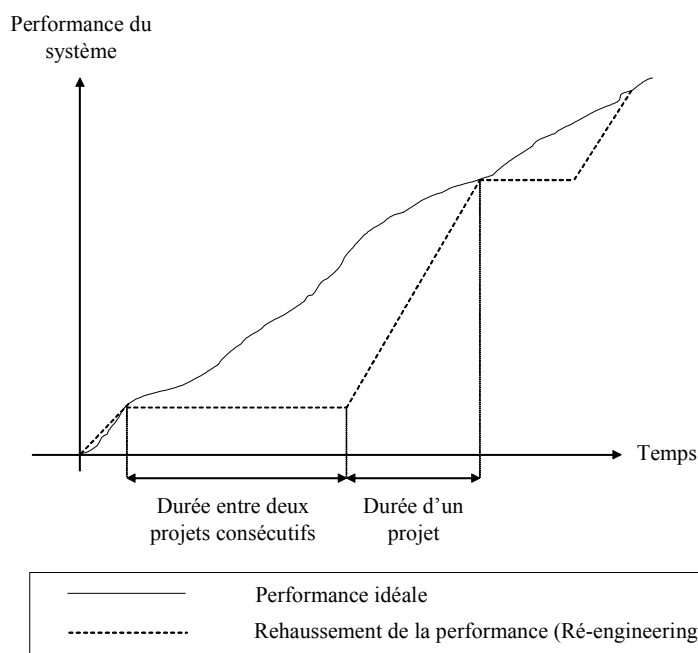


Figure 2.2 - Approche par reengineering [Malhéné, 2000]

3.1.2. L'évolution continue

A la logique de projets de reengineering s'oppose une vue d'évolution continue [Imai, 1989], reposant sur l'idée que l'efficacité d'une organisation est liée à une amélioration « permanente » ou continue d'une performance, telle que la qualité ou la productivité. Il s'agit essentiellement d'instaurer un état d'esprit, sans nécessairement déployer de gros moyens, impliquant conjointement les dirigeants et le personnel. Il est ainsi question de petites améliorations faites jour après jour, constamment. C'est une démarche d'amélioration continue plus progressive que le reengineering, visant à adapter le système de production à son environnement, au moment voulu, simplement en faisant meilleur usage des ressources existantes.

Une application reconnue du principe d'amélioration continue est la roue de Deming [Deming, 1982]. Ce dernier préconise une approche cyclique permettant, après avoir procédé à une amélioration dans l'entreprise, de vérifier que le résultat obtenu correspond à l'attente, qu'il est stable, et finalement de lancer l'amélioration suivante [Chaminade, 2005]. La roue de Deming est ainsi divisée en 4 secteurs :

- PLAN, pour définir les objectifs, identifier les besoins, inventorier les moyens nécessaires à la réalisation des objectifs, les coûts et le planning ;
- DO, pour exécuter les plans précédemment définis ;
- CHECK, pour vérifier que les objectifs visés sont atteints ;
- ACT, pour effectuer les mesures correctives si besoin est, et améliorer le projet.

L'image de Deming est que, de tour de roue en tour de roue, l'entreprise monte progressivement la pente lui permettant d'élever son niveau de performance (Figure 2.3).

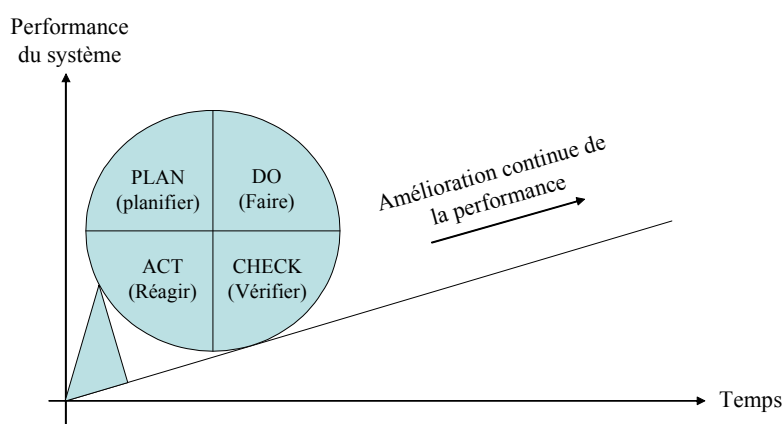


Figure 2.3 – Roue de Deming [Deming, 1982]

Le principe d'évolution continue préconise la mobilisation de l'entreprise autour de micro - projets d'amélioration (l'entreprise s'implique à tout moment dans au moins un projet), là où le reengineering procède par projets lourds plus espacés dans le temps. Pour autant, ces deux approches ne sont pas contradictoires et peuvent être considérées comme complémentaires [CPC, 1997].

3.2. Méthodes spécifiques de gestion de l'évolution d'un système de production

Nous présentons ici trois méthodes appliquées récentes permettant de gérer l'évolution d'un système de production, toutes trois issues de projets d'envergure menés en collaboration entre laboratoires de recherche et industriels.

3.2.1. La méthode GEM

Les résultats du projet EUREKA TIME GUIDE²⁵ sont à l'origine de la méthode GEM (GRAI Evolution Method). Ce projet avait pour objectif le développement d'une méthode globale d'aide au pilotage du changement, afin d'aider les petites et moyennes entreprises européennes à rester compétitives [Doumeingts et al, 1996].

²⁵ Tools and methods for the Integration and Management of Evolution of industrial firms – GUIDing the Evolution (EU1157), de mars 1994 à septembre 1996.

La méthode GEM permet de décrire la gestion des processus d'évolution d'un système industriel. Le principe est d'appréhender l'évolution d'un système comme un processus continu, constitué d'une succession d'états (Figure 2.4):

- L'état initial, correspondant à la représentation du système existant (« AS IS »). Les composants du système sont identifiés, ce qui permet de mieux comprendre le fonctionnement du système afin d'identifier les points à améliorer ;
- L'état final ou cible, décrivant les objectifs et performances souhaitées du système futur (« TO BE ») ;
- Les étapes, états - jalons vers l'état cible ;
- Les états intermédiaires (E', E'',...), situés entre deux étapes successives.

L'élaboration des spécifications fonctionnelles est tout d'abord issue de la comparaison entre les modèles de la cible et de l'existant. En découlent des spécifications organiques qui incluent l'organisation, les informations technologiques et, éventuellement, la partie physique du système. On détermine ainsi une première étape (Etape 1), situation intermédiaire du système en direction de la cible initiale (Cible 1). Par la mise en œuvre de projets successifs, dont chacun nécessite un cycle d'ingénierie (du cahier des charges aux spécifications), le système est amené en direction de l'étape 1. Il faut noter que la réalisation de l'étape 1 nécessite un temps pendant lequel l'expression de la cible peut changer, en particulier en raison des évolutions du marché. C'est pourquoi l'expression du besoin d'évolution est recalée, une fois le système rendu à l'étape 1 par la définition d'une cible réactualisée (Cible 2). Le processus d'évolution s'apparente, dans l'esprit du moins, à une tâche de *tracking*, ou poursuite, classiquement utilisée dans la commande incrémentale de systèmes technologies complexes (commande de robots par exemple).

Chaque mise en œuvre d'un projet de changement ou d'une action permettant d'implanter une solution technique caractérise un état intermédiaire. Il est possible d'identifier différents types d'actions en fonction de leur priorité d'implantation. La définition des priorités associées aux états intermédiaires se fait à travers la définition d'un "plan d'action". Dans la pratique, il est ainsi courant d'effectuer en premier lieu les étapes les plus courtes et les moins coûteuses, car elles sont plus faciles à mettre en œuvre et permettent, par une politique de petits pas, d'installer un climat de confiance vis-à-vis de la faisabilité du projet.

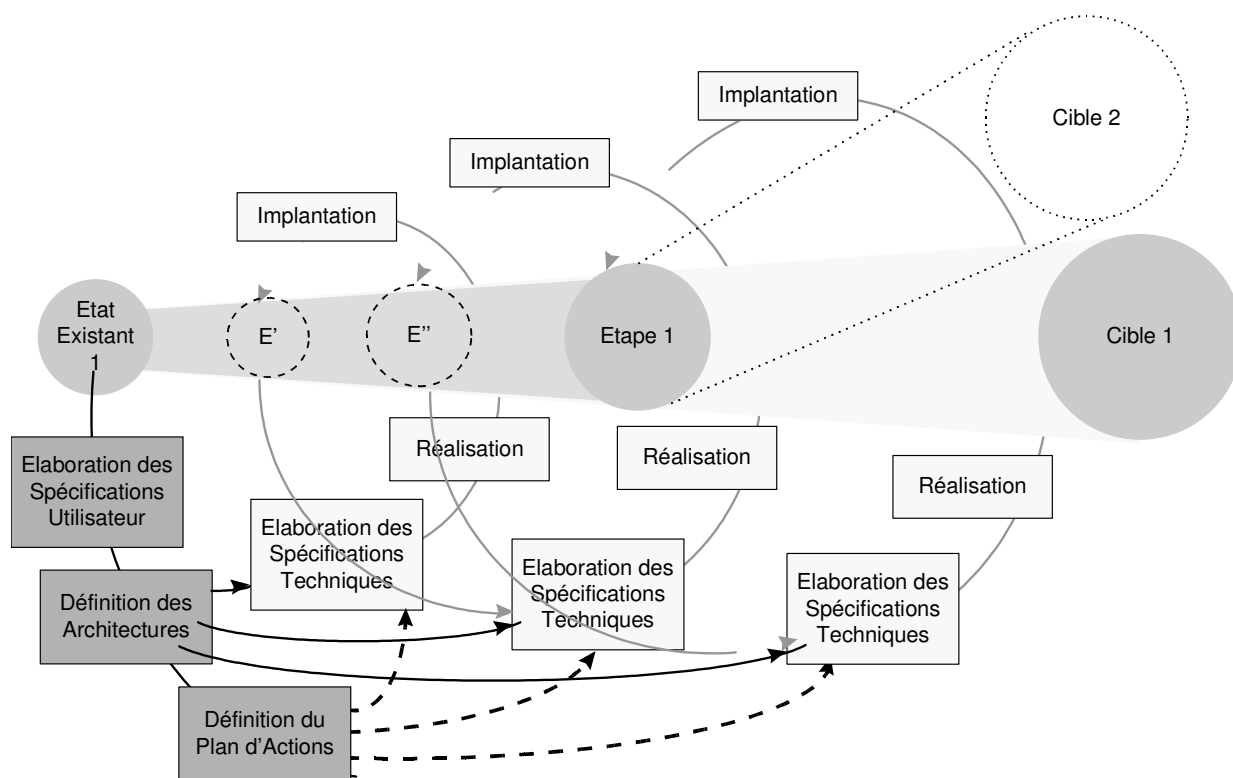


Figure 2.4 - Principe de la méthode GEM [Malhéné, 2000]

3.2.2. Le projet RÉSIPROQ

L'objectif du projet RÉSYPROQ²⁶ était de proposer aux entreprises des outils pour contrôler l'évolution de leur système de production, afin d'en maîtriser les coûts et les délais [Collaine et Gartiser, 2001]. Pour répondre à cet objectif, les partenaires du projet ont cherché à expliciter la nécessité d'évolution du système de production, à définir les cibles et à décrire la transition vers ces cibles. Enfin, en considérant la relation entre produits et systèmes de production associés, le projet a plus particulièrement donné le jour à une méthode permettant d'évaluer l'impact de l'évolution des produits sur le système de production. Cette méthode comporte plusieurs phases [Collaine, 2001] :

- Une première phase, dite de caractérisation, permet de fournir une représentation des éléments évoluant. Elle traduit les données du problème (le produit, fédérateur des évolutions ; le système de production, évoluant conjointement aux évolutions du produit ; le critère d'étude retenu, par exemple le délai de reconception du produit).
- Une deuxième phase, dite d'identification, définit l'importance relative des évolutions analysées. Elle permet ainsi d'éliminer les cas d'études trop simples (sans réel impact sur la dynamique d'évolution) ou les cas de trop fortes modifications nécessitant des investissements peu réalistes.
- Une troisième phase, dite de modélisation, construit un modèle représentatif de la propagation des évolutions du produit vers le système de production.

²⁶ Reconception, Évolution, SYstèmes de PROduction Qualitatif, programme PROSPER du CNRS, de Juin 1998 à Juin 2001.

- Une quatrième et dernière phase, dite d'évaluation, consiste à simuler le modèle pour, d'une part, représenter la propagation des évolutions, et, d'autre part, évaluer l'impact des évolutions pour le critère précédemment choisi.

3.2.3. La méthode PETRA

La méthode PETRA [Berrah et al, 2001] est le résultat de travaux communs à plusieurs laboratoires de recherche²⁷, et résulte d'expériences pratiques issues de cas industriels. Le but de la méthode est de proposer une démarche de réorganisation pragmatique et structurée des systèmes de production de biens et de services. La définition des aspects à prendre en compte dans le domaine d'étude de l'entreprise ou de la partie d'entreprise à réorganiser est une phase initiale et primordiale dans la démarche de réorganisation. PETRA considère quatre aspects essentiels de l'entreprise:

- La structure organisationnelle (centres de décision et niveaux décisionnels, mécanismes de coordination entre les divers centres) ;
- Les processus opérationnels (flux de contrôle et flux d'objets) ;
- Les traitements de données et systèmes d'information ;
- Les ressources (humaines et techniques), et plus particulièrement les compétences et le rôle de chaque acteur.

Une des principales originalités de la démarche de réorganisation proposée repose sur sa nature cyclique (ou plutôt hélicoïdale dans le temps). Elle est ainsi basée sur le cycle global constat - analyse - décision - réorganisation - mise en œuvre - évaluation (Figure 2.5) qui peut se répéter autant que nécessaire à l'instar du cycle Plan - Do - Check - Act de la roue de Deming. Des rebouclages sont également possibles entre les phases du cycle. Pour chaque phase de la démarche, un ensemble d'étapes, de méthodes et d'outils peuvent être utilisés suivant le cas à traiter. Par ailleurs, une autre originalité de la démarche concerne le pilotage du processus d'évolution par des indicateurs de performance. En effet, contrairement aux approches classiques de modélisation ou conception de systèmes, PETRA préconise, partant d'un objectif global, la mise en place d'indicateurs locaux non plus seulement de résultat / reporting mais également de processus / pilotage, qui permettent une réactivité à tous les niveaux de décision.

²⁷ Notamment le Laboratoire des Logiciels de Productique (LLP) d'Annecy et le Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique (LGIPM) de Metz.

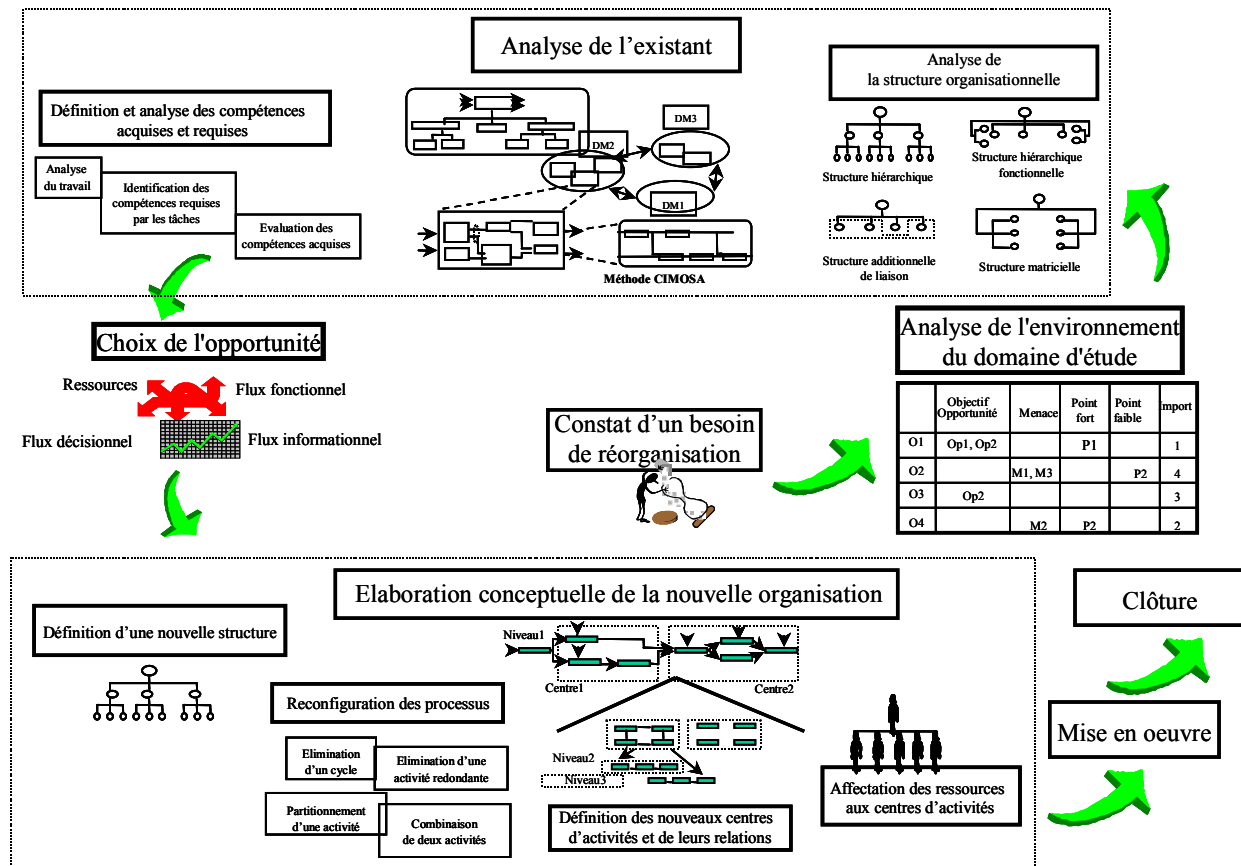


Figure 2.5 - Structure cyclique de la démarche de réorganisation PETRA [Berrah et al, 2001]

3.3. Cycle de vie du système et du produit

3.3.1. Echelle de valeur des artefacts

Le maintien, dans la durée, de la présence de l'entreprise dans le marché, justifie le pilotage de son évolution par la maîtrise conjointe des cycles de vie de son système opérant et de ses produits. Nous allons ici traduire les cycles de vie des *artefacts* système et produit en modifications plus ou moins profondes de ces artefacts, impactant leur définition organique et / ou fonctionnelle. En rapprochant les similarités entre (re)conception du produit et du système, nous tentons, d'une part, de souligner la généricité, au niveau artefact, de la problématique d'ingénierie, et, d'autre part, d'aborder conjointement les deux principaux leviers du pilotage de l'évolution de l'entreprise – du moins au plan technique – que sont la reconception du système et la reconception du produit.

En analyse de la valeur, tout *produit* est caractérisé suivant :

- des fonctions de service, qui sont les rôles attendus d'un produit ou réalisés par lui pour répondre au besoin d'un utilisateur donné [AFNOR, 1990] ;
- des fonctions techniques, qui sont les relations entre les constituants internes au produit, définis par le concepteur pour assurer les fonctions de service [AFNOR, 1990] ;
- des fonctions de réalisation, qui sont les solutions technologiques internes au produit définies par le fabricant pour réaliser les fonctions techniques [Collaine, 2001]. Dans notre terminologie, ces fonctions définissent la description organique du produit.

Nous allons utiliser et adapter ces définitions pour la caractérisation des différentes fonctions qui permettent de gérer l'évolution des *systèmes* de production. Ainsi :

- La fonction économique d'une entreprise est le rôle de l'entreprise en tant qu'acteur économique. Cette fonction, externe au système, s'apprécie donc par rapport au marché (cf. § 3.2, chapitre 1).
- Les fonctions techniques d'une entreprise sont les fonctions permettant d'engendrer la fonction économique du système dans son environnement. Parmi ces fonctions, nous distinguons les fonctions de veille, les fonctions de conduite et les fonctions de transformation. Les fonctions de veille permettent d'observer l'environnement de l'entreprise et de détecter les évolutions significatives de celui-ci (analyse du marché, veille technologique, etc.) afin de transmettre ces données aux divers centres de décision du système. Les fonctions de conduite, représentant les processus internes du système (bureau d'étude, gestion de production, etc.), concourent à la réalisation de la fonction économique. Concernant la Gestion de Production, nous retrouvons les fonctions du pilotage, à savoir « gérer les produits », « gérer les ressources » et « planifier les activités » (cf. 4.2.1.1, chapitre 1). Enfin, les fonctions de transformation permettent de mettre en œuvre la réalisation organique du système (ateliers, postes de travail, etc.).

Par cette approche, nous rendons explicites d'une part les relations entre le système et son environnement, d'autre part les relations entre les fonctions externes et les fonctions internes du système (ceci quelle qu'en soit la réalisation organique).

Citons par exemple le cas de la fonction technique de veille « vente » d'une entreprise. Cette fonction détermine les prix des produits de sorte que ceux-ci trouvent acheteurs, et ce à un prix suffisamment rémunérateur. A long terme, elle doit de plus exercer la surveillance et l'anticipation des besoins du marché et des offres de la concurrence (directe et indirecte), avec divers outils (méthodes de prévisions des ventes, démarche marketing, etc.). Si un nouveau concurrent vient à se présenter ou si les ventes de l'entreprise sont en chute, la fonction « vente » détecte alors l'événement et tous les renseignements nécessaires sont transmis aux centres de décision concernés. Ces derniers, grâce aux fonctions de conduite, élaborent les plans à réaliser. Dans ce cas précis, ils pourront ensuite faire appel à diverses fonctions techniques de « R&D » pour agir plus ou moins profondément sur le système, et / ou de « Bureau d'études » pour agir sur le produit. Les modifications effectuées sur le produit peuvent être classées suivant différents critères, selon qu'il s'agisse d'une modification d'un produit existant ou d'un produit en cours de conception. La modification d'un produit existant est la remise en cause des fonctionnalités d'un produit ou de ses composants suite à une non-conformité ou à une action d'amélioration de sa qualité alors que la production d'exemplaires a déjà eu lieu [Omri, 2003]. La modification d'un produit en cours de conception est, quant à elle, la remise en cause, en totalité ou en partie, des informations liées à un item (composant, assemblage ou document) dont le contenu a déjà été validé à divers stades de sa conception, correspondant aux jalons du processus ou d'un programme, par les acteurs à qui cette responsabilité a été confiée [Rivière et al, 2002].

3.3.2. Cycle de vie du système

Afin de mettre en évidence l'action des fonctions de conduite sur le système, nous rappelons ci-dessous le cycle de vie en $Vé^{28}$ d'un système, très utilisé pour le développement des systèmes automatisés de production [AFNOR, 1990]. Ce cycle fait apparaître la succession d'un Vé long et de plusieurs Vé courts symbolisant respectivement la genèse (conception) et

²⁸ Norme Z69-901

les modifications itératives d'un système au cours de sa vie (reconception de tout ou partie du système suivant les variations plus ou moins importantes des perturbations, externes ou internes au système). Nous détaillons le V_e long et positionnons le niveau de performance que la fonction économique atteint grâce aux reconceptions successives des fonctions techniques.

A chaque modification environnementale suffisamment importante pour impacter le système, ou à chaque dysfonctionnement interne jugé critique, il y a perturbation et une réorganisation du système s'impose. Plus les V_e de la partie exploitation sont profonds, plus la reconception sera lourde, pouvant aller d'un simple ajustement de la réalisation opérationnelle du système à une modification importante impactant ses fonctions. Plus ils sont larges, plus la reconception prendra de temps. L'ensemble des modifications effectuées sur le système permet ainsi d'adapter le système à son environnement et accroît les performances de la fonction économique du système (Figure 2.6).

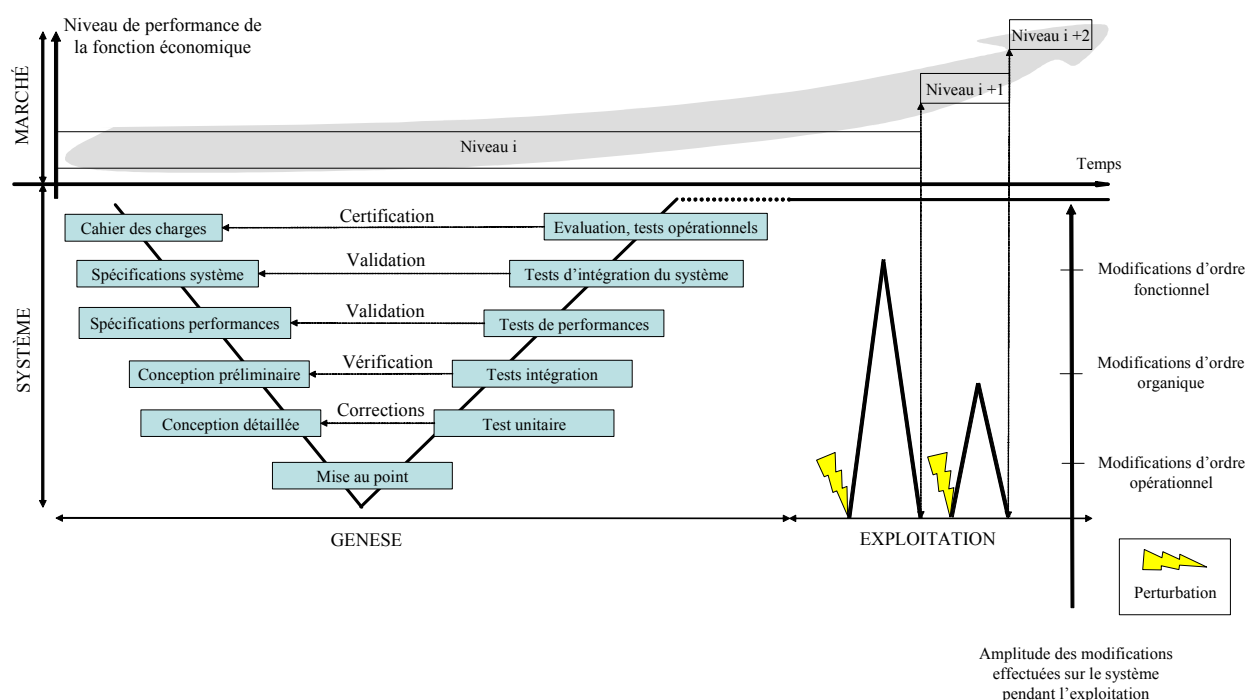


Figure 2.6 - Actions des fonctions de conduite sur le système et influence sur la fonction économique

3.3.3. Cycle de vie du produit

Les variations technologiques de ces dernières années et une concurrence toujours plus accrue ont poussé les entreprises à faire évoluer leurs activités de conception et de développement de produits, notamment dans les secteurs automobile et aéronautique. La prise en compte des développements de plate-formes²⁹ produits permet désormais de classer les différents types de projets de développement des produits sur la base de l'étendue du changement introduit par le projet (Figure 2.7). Cette typologie de projets de développement s'appuie sur la distinction classique entre innovation de produit et innovation de procédé [Gautier et Giard, 2000].

²⁹ Une plate-forme produits est définie comme un ensemble de produits individuels partageant une technologie commune, destiné à des applications reliées sur le marché. Une stratégie de plate-forme produits permet de réduire le nombre de pièces et composants, les coûts de développement des produits dérivés ainsi que les investissements nécessaires en matière de procédés de fabrication [Meyer and Lehnerd, 1997].

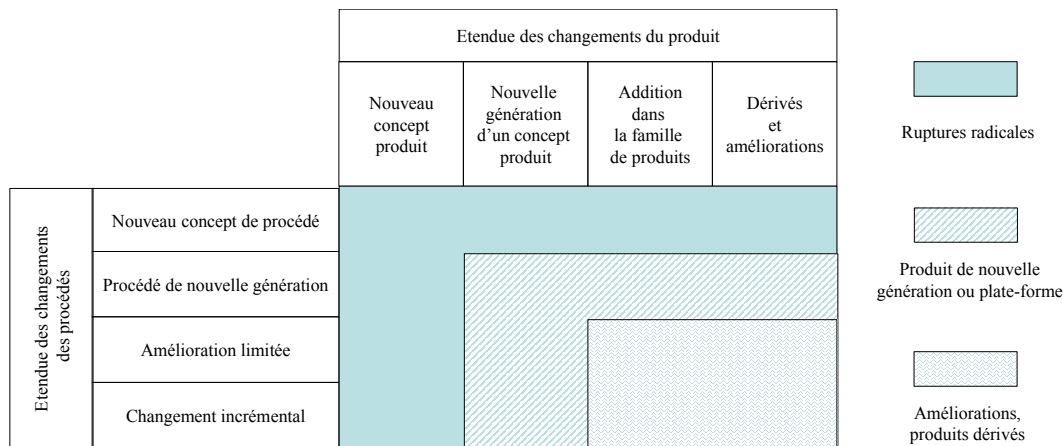


Figure 2.7 - Types de projet de développements ou évolutions [Clark and Wheelwright, 1992]

Afin de mettre en évidence l'action des fonctions de conduite sur le produit, nous rappelons le cycle de vie de celui-ci. Le cycle de vie en $Vé$ vu précédemment à propos des systèmes s'adapte également au produit. Nous choisissons ici de le superposer à une autre représentation, qui consiste en une courbe en S faisant apparaître les différentes étapes de la vie du produit en fonction des bénéfices qu'il génère (Figure 2.8). Cette courbe comporte quatre phases : la naissance, la croissance, la maturité et le déclin [Blosiu et Kowalick, 1996]. Il faut ainsi être capable de capter le besoin du client au bon moment, de savoir arrêter la production du produit avant qu'il ne soit plus rentable, ou de le relancer par innovation [Collaine, 2001]. En fonction des variations des paramètres environnementaux, les fonctions techniques de veille permettent alors de détecter les éventuels problèmes et de pallier ces derniers grâce aux scénarios d'évolution élaborés par les fonctions de conduite. La compétitivité passe donc par la mise en œuvre pour le même produit d'une succession de S dont la ligne générale est croissante. Cette succession de S représente subséquentment toutes les évolutions nécessaires que doit subir un produit afin de réaliser le maximum de bénéfices en répondant aux attentes des clients (satisfaction de la ou des fonctions de service). A chaque fois qu'un produit innovant est lancé ou qu'une amélioration est apportée au produit existant, une nouvelle courbe en S débute.

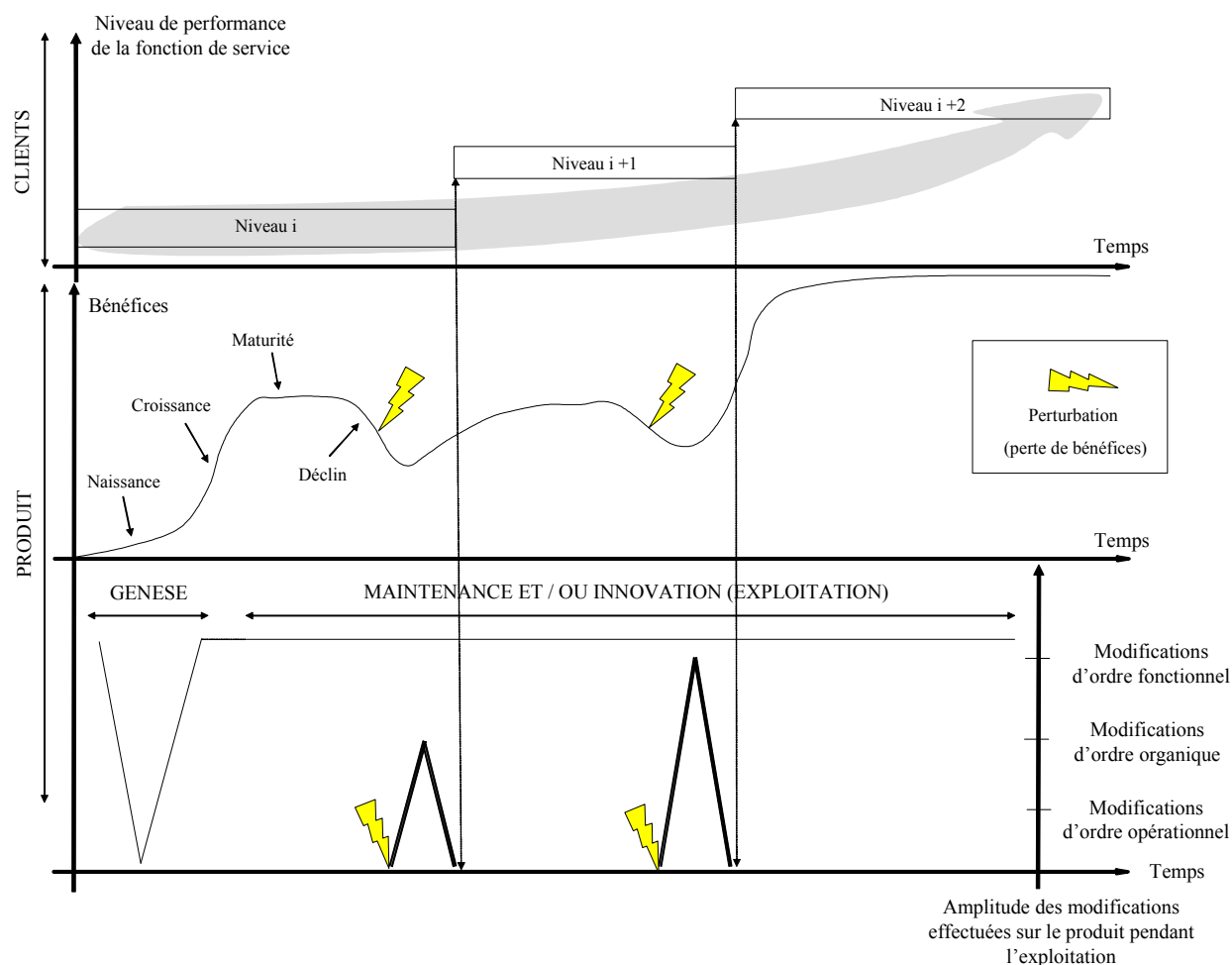


Figure 2.8 - Actions des fonctions de conduite sur le produit et influence sur la fonction de service

3.3.4. Synthèse

En réponse aux évolutions de son environnement et de ses éventuels dysfonctionnements internes, un système de production évolue avec une importance plus ou moins grande, en agissant sur sa constitution et / ou sur le produit fabriqué. Une action sur le système permet de satisfaire la fonction économique de celui-ci vis-à-vis du marché (Figure 2.9, Partie Système), tandis qu'une action sur le produit permet d'exaucer les attentes des clients, i.e. de satisfaire la fonction d'usage du produit (Figure 2.9, Partie Produit). Les fonctions techniques de veille du système et les fonctions techniques du produit permettent de faire le lien respectivement entre le système et son environnement et entre le produit et son utilisateur. Enfin, les fonctions de conduite, de transformation et de réalisation permettent de pénétrer au cœur du système et du produit pour agir directement sur leurs organes. La partie interne du système est ici conforme au découpage du système étudié au chapitre 1 (cf. § 4.1), qui consiste en un sous-système physique ou piloté (partie opérative) et un sous-système de pilotage commandant le système physique.

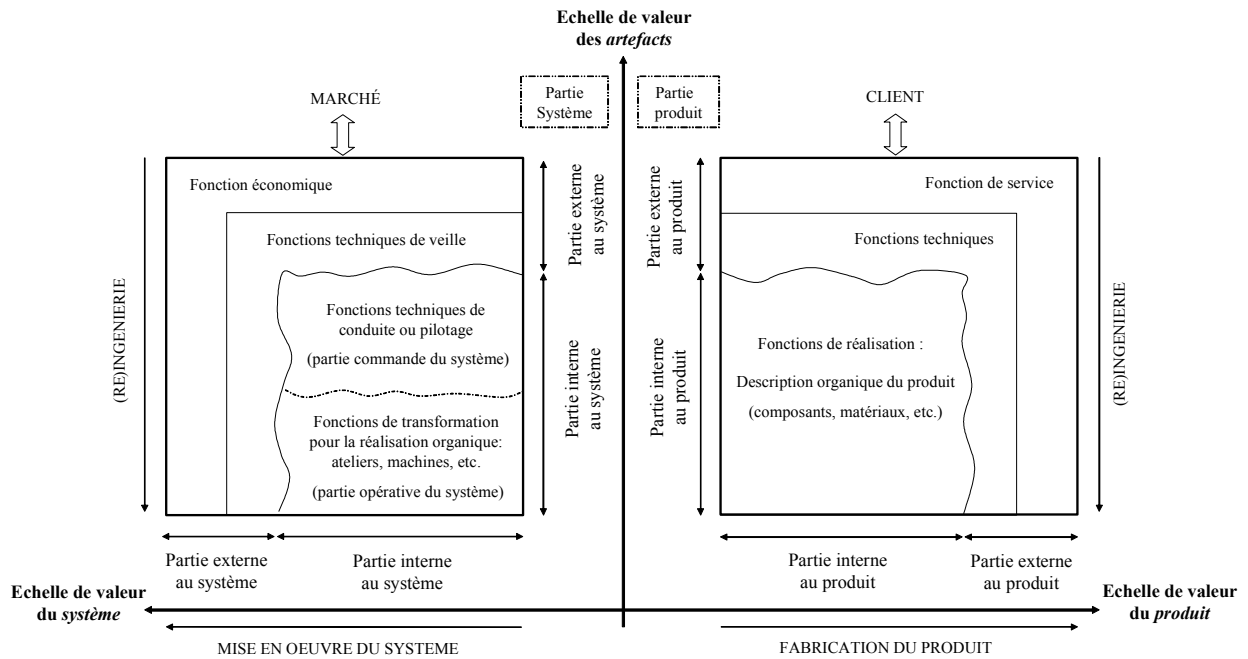


Figure 2.9 – Analogie Produit / Système

4. CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons analysé des méthodes et outils permettant de gérer l'évolution des systèmes de production. La compétitivité de l'entreprise passe ainsi par une évolution conjointe des produits et des systèmes de production, qui s'effectuent selon les impératifs du marché par des changements mineurs (politique d'amélioration continue) ou par des changements importants (politique de grands projets de ré-ingénierie et d'innovation de produits). Le type de changement à apporter dépend bien évidemment du contexte environnemental dans lequel évolue le système. Toutefois, les approches évolutionnistes existantes ne permettent pas, en l'absence des vues fonctionnelle et organique, de considérer l'impact des scénarios de ré-ingénierie sur la remise en cause du système. Nous avons subséquemment posé les bases de notre travail, en proposant une caractérisation de l'évolution suivant les changements plus ou moins importants qu'elle implique sur le système et / ou sur le produit. Ces changements peuvent affecter la définition organique seule ou la définition fonctionnelle du système et / ou des produits qu'il génère. Dès lors, la suite de notre travail va consister, d'une part, à établir un référentiel commun aux vues fonctionnelle et organique d'un même système de production, ainsi que d'en analyser les rapports (chapitre 3), et, d'autre part, à développer une méthode de modélisation de l'évolution des systèmes de production couvrant toutes les étapes de son cycle de vie (chapitres 4 et 5).



Chapitre

3

MULTI-MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION :
APPLICATION AU SYSTEME DE PILOTAGE

Sommaire Chapitre 3

Multi-modélisation des systèmes de production :
Application au système de pilotage

1. INTRODUCTION	79
2. REFERENTIEL MULTI-VUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION	79
2.1. Principes du référentiel multi-vue	79
2.1.1. Intérêt d'une modélisation multi-vue	79
2.1.2. Modèle de référence multi-vue	80
2.2. Relations entre modèles	82
2.2.1. Projection suivant un axe	82
2.2.2. Coupe suivant un plan	83
2.3. Degré d'agrégation du modèle	83
3. APPLICATION A LA MODELISATION DU PILOTAGE DE LA PRODUCTION	85
3.1. Les Modèles de conduite issus du laboratoire	86
3.1.1. La grille GRAI	86
3.1.2. Le réseau de centres de conduite	86
3.2. Modèle de données	87
3.2.1. Données de la grille GRAI	87
3.2.2. Données du centre de conduite	87
3.2.3. Complémentarité des données	89
3.3. Modèle de référence tridimensionnel pour le pilotage	89
3.3.1. Intégration du modèle GRAI et de la modélisation par centres de conduite	89
3.3.2. Traçabilité de modélisation, codification des modèles	95
3.4. Mécanismes d'agrégation du modèle du système de pilotage	96
3.4.1. Coupes	96
3.4.2. Projections	98
3.5. Méthodologie d'instanciation des modèles fonctionnel et organique du système de pilotage	98
3.5.1. Instanciation du modèle fonctionnel GRAI	98
3.5.2. Méthodologie d'instanciation du modèle organique par centres de conduite	99

3.5.3. Modélisation opérationnelle _____	103
3.6. Synthèse _____	105
4. CONCLUSION _____	107

1. INTRODUCTION

L'analyse de la littérature sur la modélisation des systèmes de production nous a conduit à faire la part des approches visant une représentation à dominante fonctionnelle des approches visant une représentation à dominante organique. Si les deux approches sont essentielles pour la compréhension globale de la structuration du système, leurs relations sont généralement peu explicites. L'objet de ce troisième chapitre est d'établir un référentiel commun aux vues fonctionnelle et organique d'un même système de production, ainsi que d'en analyser les rapports. Nous souhaitons de la sorte faciliter la manipulation des modèles d'un même système de production au cours des projets successifs de ré-ingénierie, qui supposent notamment de savoir :

- qualifier les modèles utilisés (codification, positionnement des vues) ;
- instancier les modèles partant d'un cas particulier ;
- naviguer d'une vue à l'autre en explicitant les mécanismes d'abstraction / agrégation mis en jeu.

C'est ensuite au sous-système de pilotage que nous nous intéressons plus particulièrement, la problématique de ré-ingénierie du pilotage étant au centre des recherches menées au laboratoire depuis de nombreuses années. Il était naturel d'illustrer notre référentiel de modélisation en positionnant deux approches issues du laboratoire : d'une part le modèle de conduite GRAI [Doumeingts, 1984], modèle à dominante fonctionnelle, et, d'autre part, la structuration organique du système de pilotage développée dans la thèse de Lecompte [Lecompte, 2001]. Ces deux modèles seront ainsi appliqués et discutés sur un même cas d'étude (cf. Annexe 1).

2. REFERENTIEL MULTI-VUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

2.1. Principes du référentiel multi-vue

2.1.1. Intérêt d'une modélisation multi-vue

On appelle méthode l'ensemble des démarches et des procédés rationnels permettant de démontrer une vérité, d'accomplir un travail³⁰. Une méthode est donc de manière générale une démarche raisonnée pour atteindre un but donné, par exemple la construction de modèles [Franchini et al, 1997]. Dans un tel contexte, il est courant de distinguer les méthodes mono-modèles établissant un processus d'élaboration d'un modèle exprimé dans un langage unique, des méthodes multi - modèles donnant une cohérence à un ensemble de modèles issus de formalismes différents [Denis et Lesage, 1995]. En effet, lorsque la complexité d'un système augmente, un modèle ne représente souvent qu'un aspect de ce système, ce que nous illustrons par la figure 3.1. Un modèle d'un système de production représente un point de vue fonctionnel et / ou organique, à un stade donné de son cycle de vie. En modélisation d'entreprise, c'est donc un jeu de modèles complémentaires qu'il s'agit de documenter et de positionner pour pouvoir, d'une part, offrir une représentation adaptée aux projets d'ingénierie et, d'autre part, assurer la traçabilité de la documentation en dépit des évolutions du système au cours de son cycle de vie.

³⁰ Dictionnaire de la langue française « Le nouveau petit Robert ».

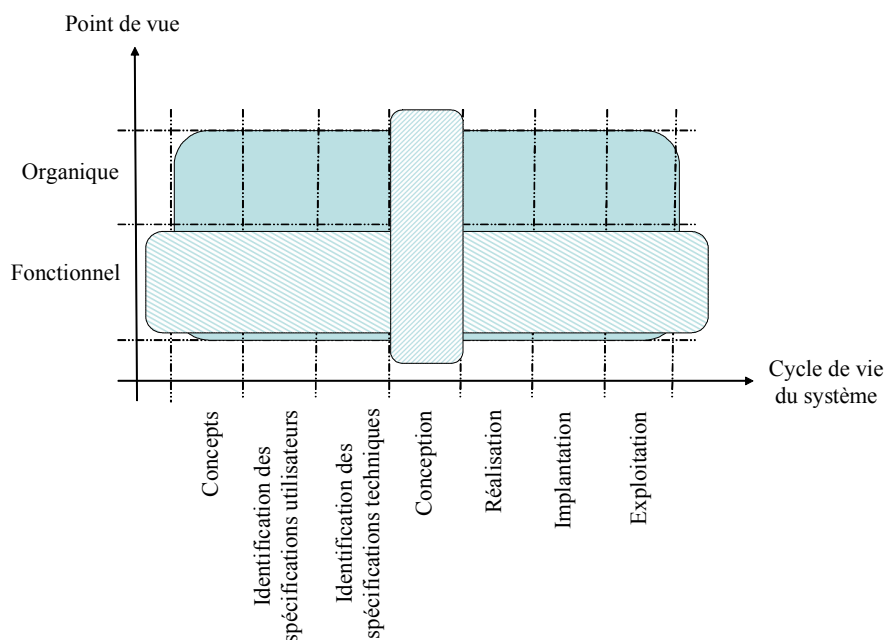


Figure 3.1 - Couverture des méthodes de modélisation, inspirée de [Denis et Lesage, 1995]

2.1.2. Modèle de référence multi-vue

La modélisation fonctionnelle d'un système de production identifie les activités que ce système réalise au cours du temps, et peut être mise en scène dans un plan (*fonction, temps*).

La modélisation organique décrit l'organisation des ressources rendant le système opérant. Elle procure une description des ressources utilisées et de la dynamique des flux matériels et informationnels entre ces ressources, et peut donc se représenter dans un plan (*espace, temps*).

L'approche fonctionnelle ignore ainsi la description spatiale de l'organisation, tandis que l'approche organique laisse implicites les fonctions réalisées. Chaque vue est indispensable à la caractérisation des systèmes de production, mais peu de liens directs entre elles ont à ce jour été proposés. CIMOSA [AMICE, 1993], toutefois, est une architecture multi – vue qui permet de construire et d'analyser des systèmes intégrés de production³¹. Au cœur de cette architecture se trouve une approche de modélisation d'entreprise basée sur les notions de processus opérationnels et de ressources. Cette approche couvre à la fois la modélisation des ressources et des aspects fonctionnels, informationnels et organisationnels de l'entreprise et ce, à divers niveaux de modélisation. Elle permet ainsi de lier les modélisations organique et fonctionnelle, mais dans une optique très large d'intégration des processus de l'entreprise. Pour notre part, nous avons cherché à élaborer un modèle de référence se concentrant sur les rôles et l'organisation du pilotage.

Les plans de modélisation fonctionnelle et organique possèdent en commun l'axe *temps*, qui classe les niveaux de représentation de la dynamique du système (échelles de temps). Un modèle de référence tridimensionnel (*espace, temps, fonction*) peut ainsi être défini pour intégrer et articuler les vues fonctionnelle et organique. La projection de ce modèle suivant l'axe des espaces permet subséquemment de retrouver une modélisation fonctionnelle du système, tandis qu'une projection suivant l'axe des fonctions permet d'accéder à une modélisation organique de ce même système (Figure 3.2).

³¹ Voir chapitre 1, § 5.3.1.

Les formalismes de modélisation utilisés pour représenter les vues fonctionnelle et organique sont laissés au choix de l'analyste, mais l'efficacité de l'articulation entre les modèles dépendra de la possibilité de coordonner les modèles choisis.

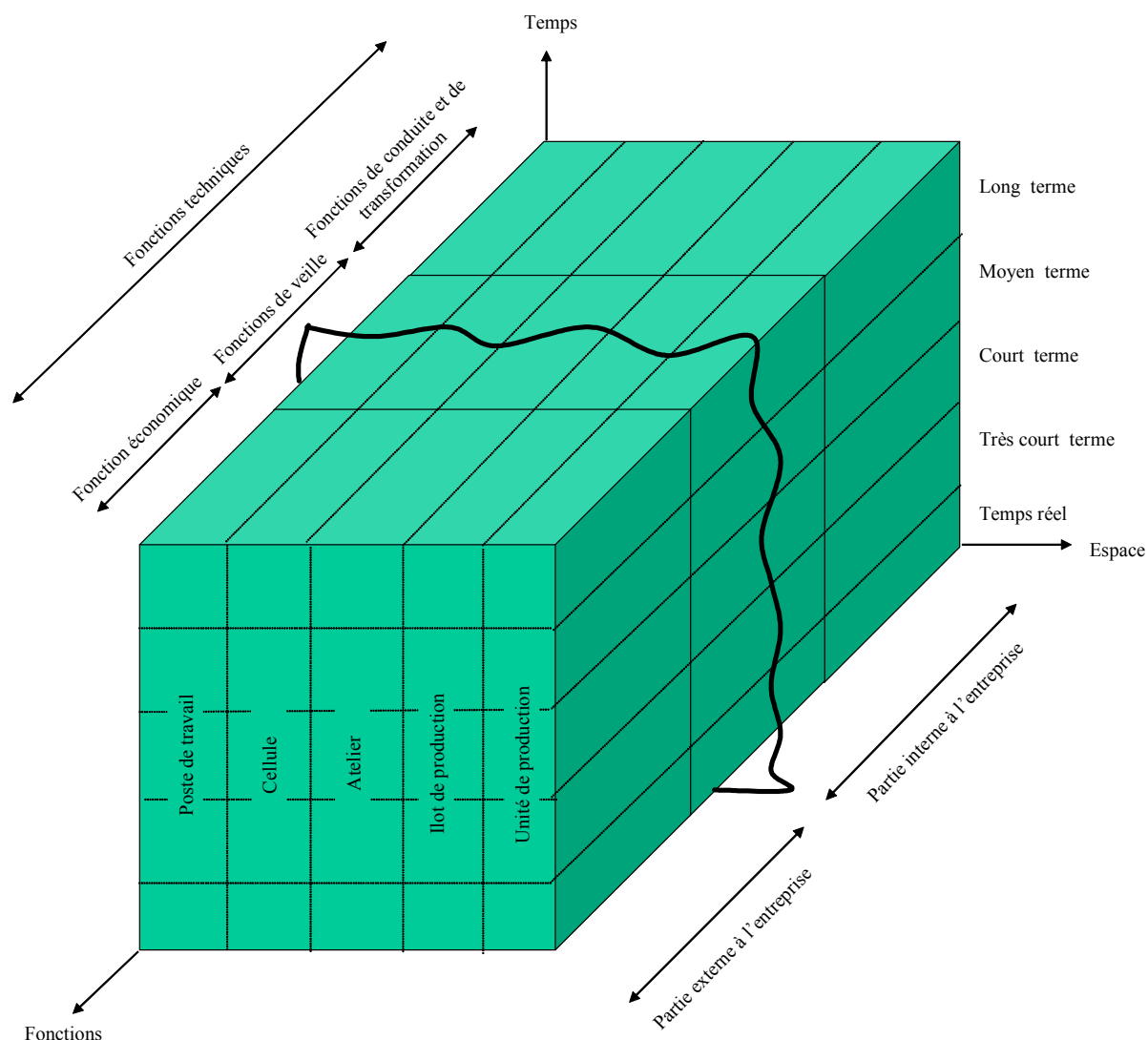


Figure 3.2 - Référentiel tridimensionnel générique pour la modélisation d'entreprise

L'axe des temps permet d'observer la dynamique du système. A chaque niveau temporel est associée une certaine variabilité des paramètres internes et externes à l'entreprise, fluctuant tous au cours du temps, mais à des rythmes différents.

Nous distinguons sur l'axe des fonctions trois degrés de granularité fonctionnelle (cf. chapitre 2, § 3.3.1) :

- La fonction économique est la plus « agrégée ». Elle permet de situer le rôle de l'entreprise vis-à-vis du marché et d'assurer les connexions avec celui-ci. C'est la vue externe de l'entreprise.
- Les fonctions techniques assurent son exploitation et la gestion de son évolution. Nous différencions :
 - Les fonctions techniques de veille (marketing, prévision des ventes, analyse stratégique, etc.) permettant de faire le lien entre le système et son environnement en

adaptant continuellement l'organisation interne de l'entreprise pour pérenniser sa fonction économique.

- Les fonctions techniques de conduite (achats, planning, ordonnancement, expéditions, maintenance, etc.), représentant les processus internes de pilotage du système, concourent à la réalisation de la fonction économique.
- Enfin, les fonctions techniques de transformation, par la mise en œuvre du processus de conduite, réalisent la valeur ajoutée matérielle.

L'axe de l'espace définit la distribution des ressources d'un point de vue organique en considérant plusieurs échelles spatiales. A un premier échelon, on considère l'entreprise comme une unité agrégée. A un échelon de détail supplémentaire, on prend en compte les différents sites composant l'entreprise et ainsi de suite. Le niveau de détail maximal implique la vue interne des ateliers révélant ses ressources élémentaires.

Ce référentiel rend possible la description du modèle du système de production à toute échelle du temps et de l'espace, et ce pour la mise en œuvre de toute fonction. Son utilité est de garder explicite le lien entre les vues organique et fonctionnelle au fur et à mesure de la progression des spécifications de conception ou de reconception d'un système complexe. L'approche combinée des deux modèles vise à tirer avantage des bénéfices de chacun, en offrant aux analystes des moyens de représentation adaptés aux besoins. Il est important de noter que le référentiel offre un cadre générique, qu'il s'agira d'instancier au cas d'étude en présence. Un exemple est traité en Annexe 1.

2.2. Relations entre modèles

Le référentiel défini au paragraphe précédent offre une base de modèles d'un même système de production. Nous nous intéressons ici aux liens que l'on peut établir entre ces modèles par des opérations d'agrégation / abstraction de deux types : la *projection suivant un axe*, qui consiste à abstraire la modélisation en occultant l'une des coordonnées (espace, temps ou fonction), et la *coupe*, obtenue en fixant l'une de ces coordonnées.

2.2.1. Projection suivant un axe

- En effectuant une projection suivant l'axe des fonctions, on retrouve le plan (espace, temps) propre à la modélisation organique.
- En effectuant une projection suivant l'axe des espaces, on retrouve le plan (fonction, temps) de la représentation fonctionnelle.
- Enfin, en effectuant une projection suivant l'axe des temps, on obtient une représentation dans le plan (*fonction, espace*) qui rend compte des fonctions assurées par l'organisation. Toutefois, cette dernière projection ne permet pas d'observer la dynamique du système et présente à notre sens peu d'intérêt. Ces propos sont résumés figure 3.3 et seront illustrés sur l'exemple détaillé en Annexe 1.

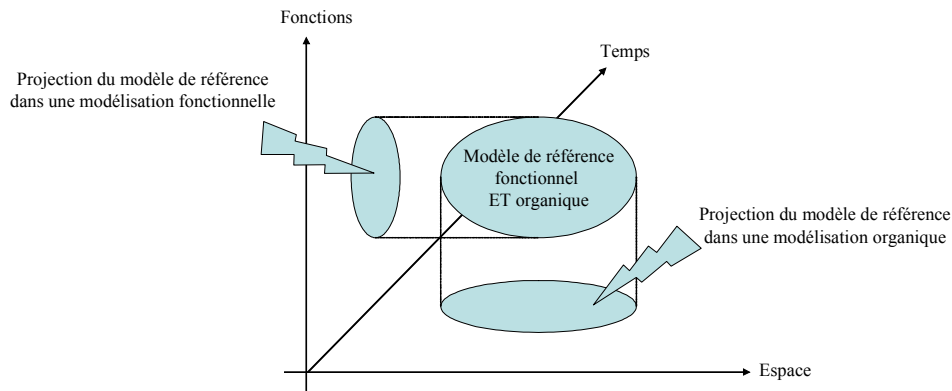


Figure 3.3 – Projections du modèle de référence, adaptée de [Roque et al, 2004]

2.2.2. Coupe suivant un plan

Une coupe perpendiculaire à l'axe fonction engendre un plan (*espace, temps*) décrivant la réalisation d'une fonction particulière dans le temps et dans l'espace. Une coupe perpendiculaire à l'axe espace engendre une représentation dans le plan (*fonction, temps*), c'est-à-dire une représentation des fonctions réalisées par l'entreprise à une échelle spatiale donnée (un atelier ou une unité quelconque). Enfin, une coupe perpendiculaire à l'axe temps permet de sélectionner un niveau décisionnel particulier pour une description conjointement fonctionnelle et organique du système.

2.3. Degré d'agrégation du modèle

Le référentiel présenté vise à situer le modèle d'une entreprise suivant trois dimensions : l'espace (réalisations organiques du système), le temps (dynamique et variabilité du système) et les fonctions (rôles et processus mis en œuvre). Toute modélisation étant en soi nécessairement tributaire d'une vue simplificatrice (i.e. agrégée) du système, nous croyons utile, dans un contexte d'ingénierie, de rappeler à l'analyste quel est le niveau d'agrégation (i.e. la distance au réel) de la représentation manipulée, et, ce faisant, de l'aider à naviguer dans la base de modèles – soit dans le sens d'une abstraction, soit dans le sens du raffinement du modèle -.

Nous définissons le degré d'abstraction d'un modèle par ses coordonnées dans le référentiel (espace, temps, fonction). En nous inspirant des travaux de Zolghadri [Zolghadri, 1998], chaque axe du repère peut être gradué en degrés d'agrégation, qui indiquent le nombre de pas d'agrégation subis par une coordonnée (Figure 3.4).

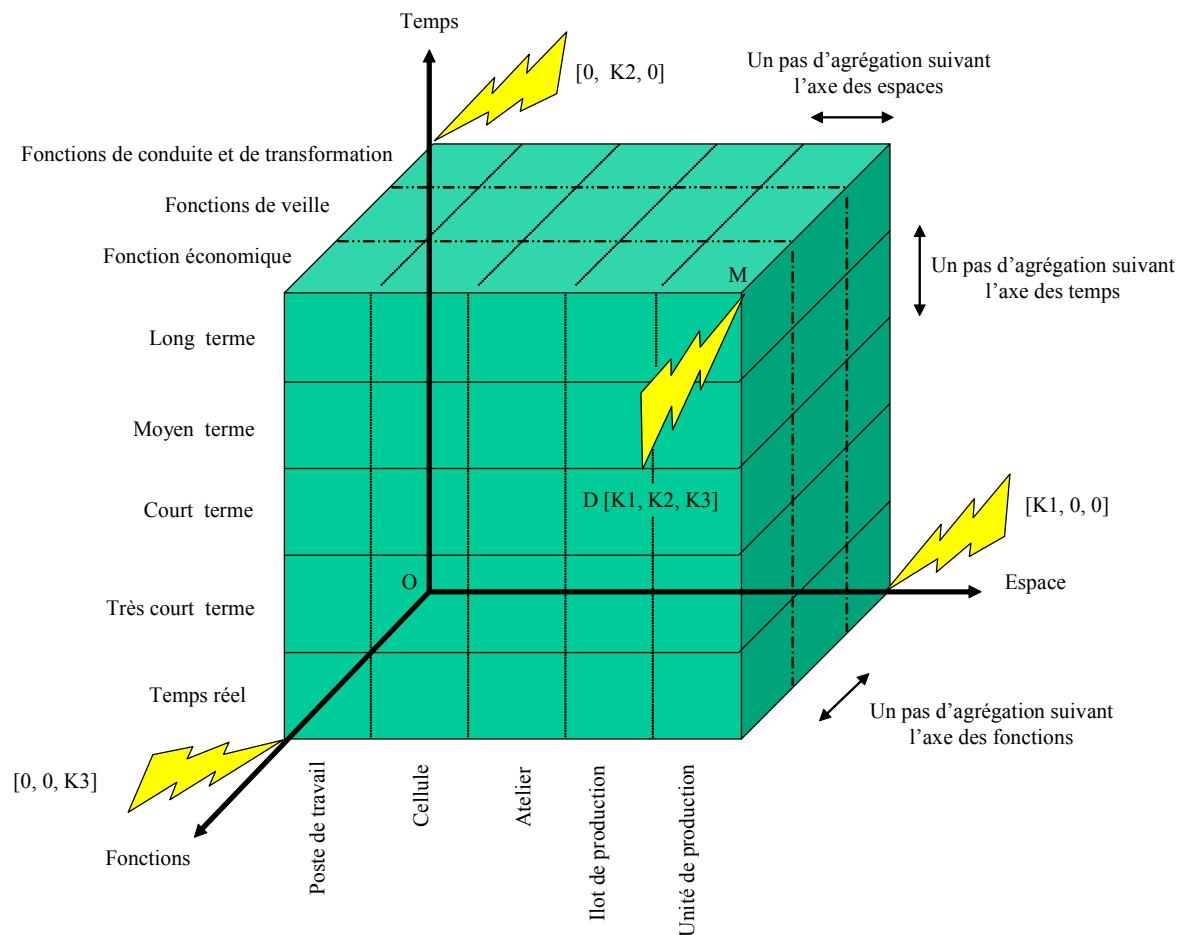


Figure 3.4 – Référentiel d'agrégation des modèles

Une coordonnée détermine une échelle de définition du système dans l'espace, le temps, ou du point de vue fonctionnel. Un modèle est positionné par ses trois coordonnées. Selon [Zolghadri, 1998], l'espace d'agrégation est discret et borné. Le nombre de degrés d'agrégation est limité et il existe un entier naturel qui constitue une limite supérieure du degré d'agrégation pour chaque axe de l'espace d'agrégation :

- K_1 est la limite supérieure du degré d'agrégation pour l'axe des espaces ;
- K_2 est la limite supérieure du degré d'agrégation pour l'axe des temps ;
- K_3 est la limite supérieure du degré d'agrégation pour l'axe des fonctions.

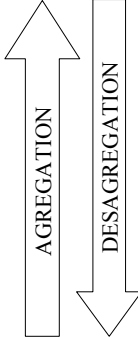
On remarque dans ce référentiel deux points particuliers : le point O de moindre agrégation, et le point M d'agrégation maximale.

Le point O, origine du repère, correspond au modèle représentant exhaustivement le système, dans ses moindres détails, selon les trois axes. Conceptuellement, ce degré zéro d'agrégation du modèle correspond au système lui-même.

Le point M d'agrégation maximale représente le modèle de coordonnées $[K_1, K_2, K_3]$. Il illustre la description à long terme de l'unité de production (vue en tant que telle), pour la mise en œuvre de la fonction économique.

En réalité, il est peu pertinent d'agréger le modèle du système de production de manière indépendante sur les trois axes du référentiel. En particulier, la planification des activités sur

le long terme (niveau stratégique) n'a de sens que par rapport à une vue organique fortement agrégée du système opérant, car il est en pratique illusoire de planifier sur une très longue période le fonctionnement des ressources détaillées. Aussi l'agrégation / désagrégation du temps (horizons de planification) sera-t-elle indissociable de l'agrégation / désagrégation de l'espace et des fonctions (Figure 3.5).



Echelle temporelle	Echelle organique	Echelle fonctionnelle	Paramètres évoluant
Long terme	Unité de production	Fonction économique	Spécifications des produits fabriqués; Technologies employées; Etc.
Moyen terme	Ilot de production	Fonctions de veille	Contraintes législatives; Contraintes structurelles (compétence personnel, capacité machines, etc.); Etc.
Court terme	Atelier		
Très court terme	Cellule	Fonctions de conduite et de transformation	Contraintes opérationnelles; Pannes; Absences personnel; Etc.
Temps réel	Poste de travail		

Figure 3.5 – Couplage entre les trois axes d'agrégation / désagrégation

Dans ces conditions, un espace restreint de modélisation peut être défini, qui contient tous les modèles utiles pour une problématique de conduite. Nous reviendrons sur cette remarque dans le paragraphe suivant.

3. APPLICATION A LA MODELISATION DU PILOTAGE DE LA PRODUCTION

Le référentiel introduit au paragraphe précédent permet de positionner les différents modèles relatifs à un même système en qualifiant leur niveau sémantique selon trois axes (fonctionnel, organique, dynamique). Nous allons ici particulariser l'étude au système de pilotage – au niveau opérationnel³² - d'une organisation de production manufacturière, et comparer deux approches de modélisation (l'une à dominante fonctionnelle, l'autre à dominante organique) issues du laboratoire : le modèle de conduite basé sur l'utilisation de la grille GRAI [Doumeingts, 1984] et la modélisation par centres de conduite développée dans la thèse de Lecompte [Lecompte, 2001]. Ces deux approches vont être appliquées à un même cas d'étude. Nous analyserons alors comparativement leur méthodologie de mise en œuvre et chercherons leur complémentarité.

La modélisation par la grille GRAI va permettre d'identifier les fonctions de conduite, les processus et les variables de décision propres au cas étudié. La modélisation par centres de conduite va, quant à elle, s'attacher à décrire les rapports entre le système de pilotage et l'organisation physique des ressources de production.

³² Le niveau opérationnel d'une entreprise décrit, dans le cadre d'une structure « stable » de celle-ci, les modes opératoires mis en œuvre, et concourt directement aux activités réalisées dans l'entreprise (cf. Chapitre 2, § 2.5). On peut considérer ici qu'il s'agit de gestion de production, c'est-à-dire de l'action de gérer, d'administrer et d'organiser l'entreprise au niveau de la production.

3.1. Les Modèles de conduite issus du laboratoire

3.1.1. La grille GRAI

La grille GRAI [Doumeingts, 1984] s'appuie sur un certain nombre de théories et concepts :

- la théorie des systèmes [Lemoigne, 1977], [Lemoigne, 1990], [Mélèse, 1972] ;
- la théorie des systèmes hiérarchisés [Mesarovic et al, 1980] ;
- la théorie des organisations [Mintzberg, 1994] [Simon, 1977] ;
- les systèmes à événements discrets [Pun, 1977] [David and Allah, 1989] ;
- les concepts de gestion de production [Doumeingts et al, 1983], [Giard, 1988].

La grille GRAI détermine comment les trois fonctions génériques de la gestion de production (gérer les produits (GP), gérer les ressources (GR) et planifier (PL)) sont pilotées à différents niveaux décisionnels (c'est-à-dire selon différentes bases de temps distinctes). Elle représente, par un ensemble de centres de décision communicants, l'architecture de conduite d'un système de production en vue d'en détecter les éventuels dysfonctionnements. Elle appréhende la conduite à travers ses *fonctions*, sans détailler l'organisation physique des ressources mises en œuvre pour les réaliser.

3.1.2. Le réseau de centres de conduite

La modélisation du système de pilotage en tant que réseau de centres de conduite [Lecompte, 2001] s'appuie sur différents concepts :

- l'approche multi agents [Ferber, 1995] ;
- les concepts de gestion de production multi - niveau [Mercé, 1987], et leur généralisation à la prise en compte conjointe et récursive de l'allocation des tâches au fur et à mesure de la désagrégation des plans et des données techniques afférentes (gammes de fabrication, ressources) [Zolghadri, 1998] ;
- les concepts de planification MRP [Orlicky, 1975] ;
- la formalisation algébrique du lien entre calcul des besoins et composants, calcul des charges de travail et gestion des stocks, notamment par une technique de pseudo - inversion [Dombre et Khalil, 1989].

Un centre de conduite est une entité décisionnelle qui pilote une ressource opératoire plus ou moins agrégée (station de travail, cellule, ligne, atelier, ...). Les centres de conduite communiquent entre eux au sein d'un réseau qui constitue, à un certain niveau d'agrégation, le modèle du système de conduite. 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 (contrôlées par d'autres centres). Chaque centre de conduite étant associé à une ressource opératoire (physique ou agrégée), il y aura à chaque niveau autant de centres de conduite que de ressources. Chaque centre de conduite est amené à effectuer un calcul de besoin (fournitures) et/ou de charge (estimation des travaux de transformation à réaliser), puis en conséquence une allocation du travail à accomplir. Pour ce faire, il utilise :

- des données statiques : gammes de fabrication, nomenclatures, ressources de transformation et de transport, propres ou sous-traitées.

- des données dynamiques fournies par un tableau de bord régulièrement mis à jour par le suivi de production : niveaux des stocks, besoins en produits et charges de travail, disponibilité des ressources, etc.

L'association et l'encapsulation des centres de conduite déterminent l'architecture de conduite multi-niveau du système de production considéré, interagissant avec les autres acteurs industriels (fournisseurs, sous-traitants, commanditaires et clients). Il en découle une description des ressources utilisées et de la dynamique des flux matériels et informationnels entre ces ressources.

3.2. Modèle de données

La construction d'un modèle du système de pilotage suppose la mise à disposition des données caractéristiques du cas étudié. Il nous faut ici considérer, d'une part, les données nécessaires à la grille GRAI, et, d'autre part, les données reprises par la modélisation par centres de conduite, pour enfin articuler ces données dans le modèle tridimensionnel. Il est en effet nécessaire d'assurer l'intégration cohérente de toutes ces données relatives au cas étudié, qui sont à la base des informations plus ou moins agrégées que manipuleront les analystes « clients » du modèle.

3.2.1. Données de la grille GRAI

La grille GRAI s'attache à illustrer la cohérence décisionnelle, en mettant en avant toutes les données nécessaires à la prise de décision. Toutefois, sont uniquement représentées dans une grille:

- Les données d'interfaçage du système de Gestion de Production avec le monde extérieur (données externes), qui informent sur l'environnement de l'entreprise, essentiellement d'ordre commercial. Les données commerciales permettent de renseigner les décideurs quant aux évolutions des modes de consommation, d'évaluer la concurrence, de mesurer l'adéquation de la production de l'entreprise avec la demande réelle du marché, etc. Il s'agit de données dynamiques (variables au cours du temps), avérées ou estimées.

- Les données d'interfaçage du système de Gestion de Production avec le système physique (données internes de suivi de production) : données de production, données relatives aux hommes, aux machines et aux outillages. Il s'agit de données dynamiques, qui permettent à l'entreprise de planifier la production, en tenant compte des contraintes qui y sont associées (taux d'occupation des machines, disponibilité du personnel, etc.).

3.2.2. Données du centre de conduite

Le centre de conduite, tout comme la grille GRAI, considère les données d'interfaçage du système de Gestion de Production avec le monde extérieur et une vue agrégée du système physique. Il tient compte des données caractéristiques des ressources et des produits, ainsi que de la manière de les transformer (gammes opératoires). Ces données donnent une vision d'ensemble de l'état du système et de tous les moyens disponibles pour la réalisation des activités de production.

Sont associées à chaque centre de conduite les données suivantes [Lecompte, 2001]:

- O (*card* $O = w$) : ensemble des w types d'objets connus du centre de conduite. O définit l'univers local des objets ou nomenclature d'objets.

- O_u, O_x, O_y : nomenclatures des composants, produits semi-finis et produits finis, avec $O = O_u \cup O_x \cup O_y$.

- T (card $T = s$) : nomenclature des s transformations de toute nature (assemblage, désassemblage, usinage, etc.) connues du centre de conduite.
- $S = (S_1 \dots S_i \dots S_w)^T, S_i \in \mathbb{N}$: vecteur de stock général. Les composantes de S représentent des quantités de produits selon la nomenclature d'objets O .
- $W = (W_1 \dots W_j \dots W_s)^T, W_j \in \mathbb{N}$: vecteur travail. Les composantes de W représentent des quantités de transformations selon la nomenclature des transformations T .

La mise en œuvre des transformations impacte les quantités d'objets, en consommant certains et en produisant d'autres. Le bilan d'une transformation est représenté par un réseau de Petri : 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 (Figure 3.6).

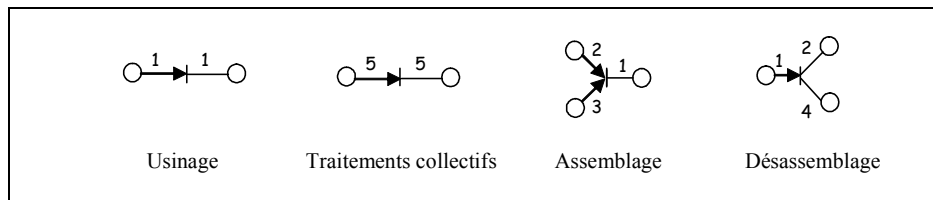


Figure 3.6 - Modélisation des transformations par réseau de Petri

Les relations de précedence entre transformations conduisent à établir un réseau de Petri modélisant le *processus de transformation généralisé* [Bourrières, 1998] sous la forme d'un triplet $G = \langle O, T, C \rangle$ avec C matrice d'incidence du graphe G .

L'élément C_{ij} , ($C_{ij} \in \mathbb{Z}, 1 \leq i \leq w, 1 \leq j \leq s$) 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 3.7).

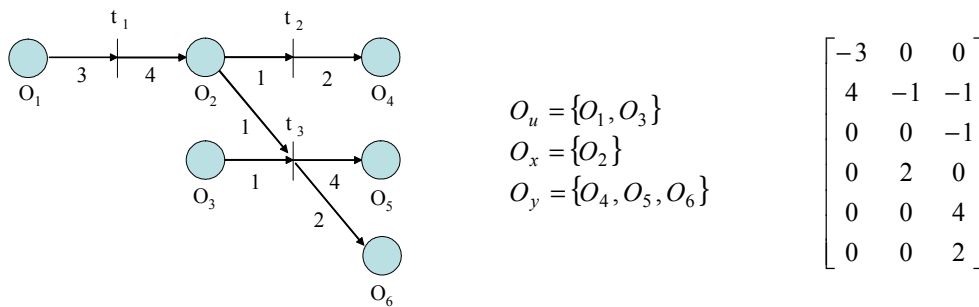


Figure 3.7 - Exemple de processus de transformation généralisé

La mise en oeuvre d'un travail W engendre alors une variation du stock généralisé selon la relation suivante [Lecompte, 2001]:

$$\Delta S = S' - S = CW$$

avec S et S' les vecteurs de stock avant et après le travail W .

En définitive, les ensembles O et T , ainsi que la matrice C , déterminent les données statiques de la Gestion de Production, tandis que les vecteurs S et W en constituent les données dynamiques.

3.2.3. Complémentarité des données

Les données manipulées au sein de la grille GRAI sont essentiellement qualitatives, celles utilisées dans la modélisation de [Lecompte, 2001] sont quantitatives. L'approche globale de la grille GRAI permet de conserver une vue générique de l'ensemble du système de pilotage afin de se concentrer sur la performance globale attendue, et « charpente » ainsi l'approche organique. L'approche quantitative va permettre de décliner le modèle fonctionnel par des désagrégations successives des données manipulées, jusqu'à impliquer les décisions opérationnelles.

En considérant conjointement les données manipulées au sein de la grille GRAI et celles du centre de conduite, chaque décideur dispose de toutes les données nécessaires. S'agissant ici exclusivement de l'exploitation d'un système de production, il s'agira de décisions du type gérer les produits (GP), gérer les ressources (GR) ou planifier les activités de production (PL) (Figure 3.8).

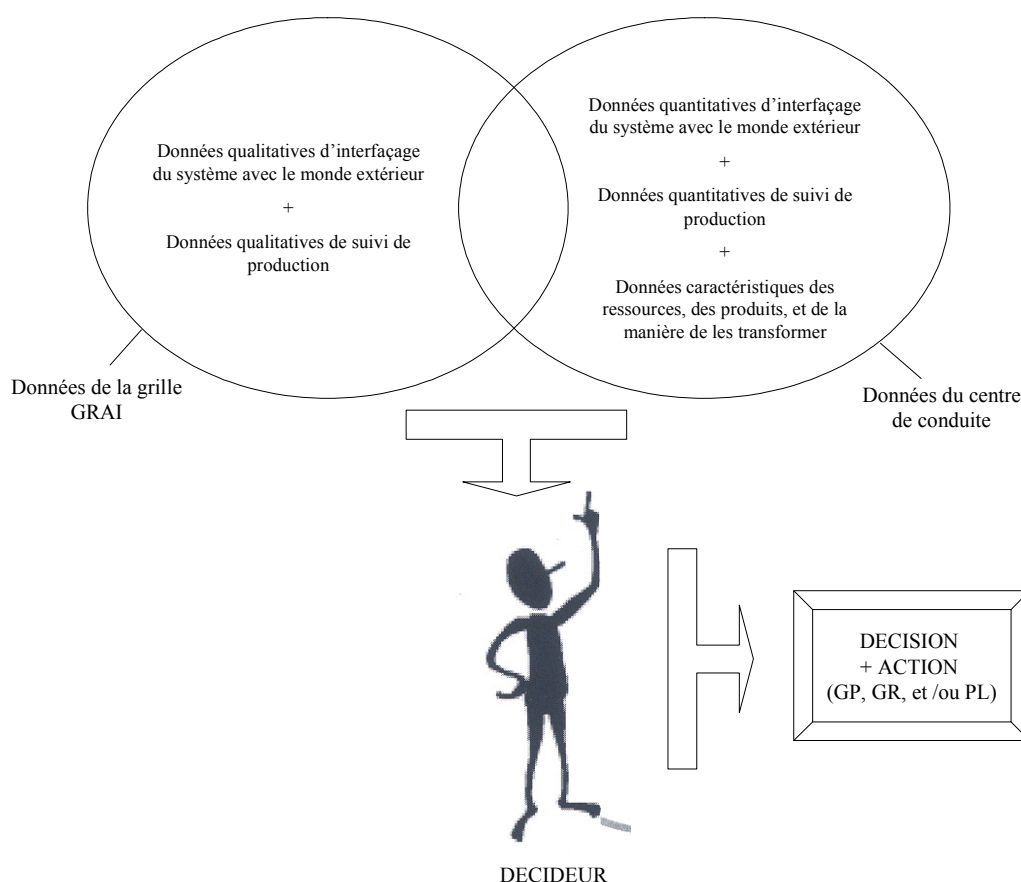


Figure 3.8 – Ensemble des données nécessaires pour piloter l'exploitation du système de production

3.3. Modèle de référence tridimensionnel pour le pilotage

3.3.1. Intégration du modèle GRAI et de la modélisation par centres de conduite

Les deux approches de modélisation étudiées ont un caractère générique et visent, une fois dédiées à un cas, à faciliter l'étude et l'amélioration du système de pilotage, tout particulièrement au niveau gestion de la production. La grille GRAI met l'accent sur le système de décision et constitue un modèle de référence utilisable en conception ou reconception du pilotage d'organisations productives. Les performances attendues du système

à conduire (système physique) sont appréhendées au travers d'indicateurs agrégés multi-dimensionnels (coût, qualité, délai). La modélisation par centres de conduite, quant à elle, fournit un cadre formel de décision pour l'exploitation multi-niveau de systèmes distribués (i.e. en réseau). Chaque centre de conduite dispose de données locales et de tableaux de bords agrégés lui permettant, sous contrôle de règles de cohérence, de réaliser les objectifs exogènes (commandes échéancées) et endogènes (stratégies locales d'exploitation) en exploitant l'autonomie de décision des centres.

Un centre de décision d'une grille GRAI se concentre sur une fonction déterminée de la gestion de production (GR, GP ou PL), alors qu'un centre de conduite réalise un scénario complet de gestion de production, ce qui nécessite implicitement d'assurer conjointement les trois fonctions de la gestion de production. Ainsi, au niveau stratégique, un centre de conduite cumule les fonctions mises en œuvre par les trois centres de décision du niveau stratégique de la grille. De la même manière, chaque centre de conduite du niveau tactique est la fusion des trois centres de décision du niveau tactique de la grille, et chaque centre de conduite de niveau opérationnel est la fusion des trois centres de décisions opérationnels de la grille, etc.

Le modèle GRAI est destiné à être utilisé pour la « ré-ingénierie fonctionnelle » du pilotage du cas étudié, et porte principalement sur la description des *processus* décisionnels. La modélisation par centres de charge est destinée à la « ré-ingénierie organique » du pilotage du cas étudié, et nécessite la description de l'agencement des *ressources* dans l'espace. Le fait d'intégrer ces deux modèles va permettre de disposer d'une modélisation unifiée du pilotage des systèmes de production permettant de lier les structures décisionnelles aux fonctions qui les justifient [Spérandio et al, 2003].

Le référentiel tridimensionnel de modélisation introduit au paragraphe précédent, appliqué au système de pilotage, met en rapport les descriptions fonctionnelle et organique de celui-ci (Figure 3.9). Il est toutefois important de rappeler qu'il s'agit du pilotage de *l'exploitation* du système qui se concentre sur les aspects purement opérationnels du système, sans modifier ni la structure, ni les fonctionnalités de ce dernier.

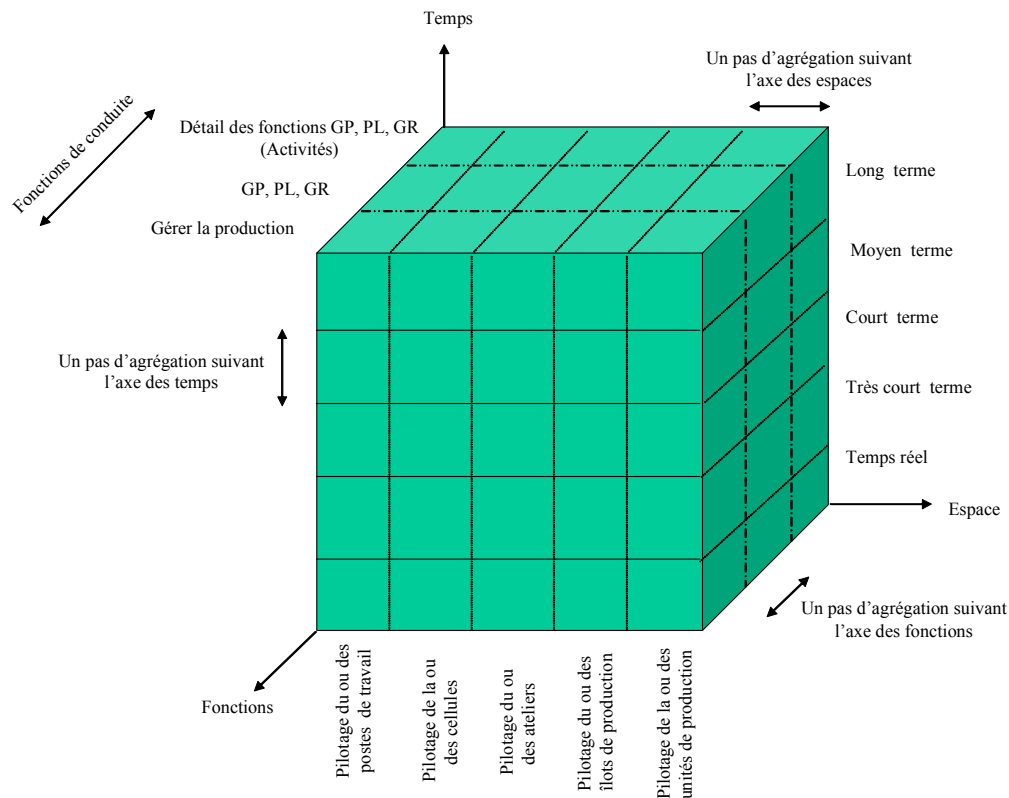


Figure 3.9 – Modèle de référence tridimensionnel pour le pilotage

Dans le référentiel tridimensionnel (espace, temps, fonction), l'architecture du système de pilotage est décrite par le positionnement de chaque centre de conduite selon :

- Son degré d'agrégation spatiale : quelles sont les unités opérationnelles et les centres de conduite associés visibles au niveau d'agrégation considéré. Cette notion est propre à la modélisation par centres de conduite.
- Son degré d'agrégation temporelle : horizon et période du pilotage. Cette notion est commune au modèle GRAI et à la modélisation par centres de conduite.
- Son degré d'agrégation fonctionnelle : s'agissant ici d'un système de pilotage, la fonction la plus agrégée est la fonction Gestion de la Production, constituée des fonctions GP, PL et GR, tandis que le raffinement de ces dernières conduit à en considérer les activités constitutives. Ce concept est propre à la grille GRAI.

L'axe de l'espace définit, conformément au référentiel tridimensionnel introduit au paragraphe 2, la distribution des ressources d'un point de vue organique suivant plusieurs échelles spatiales. Cet axe permet donc le passage d'une représentation externe d'une ressource donnée de niveau v à la représentation interne détaillée de niveau $v - 1$ de cette ressource (Figure 3.10).

La décomposition d'une ressource agrégée en un ensemble de ressources détaillées est simultanément sémantique et spatiale :

- sémantique, car elle introduit des entités nouvelles, propres au niveau détaillé. Ainsi décompose-t-on un atelier en lignes de production, une ligne de production en postes de travail, etc.

▪ cardinale, car le nombre de ressources détaillées constitutives d'une ressource agrégée est caractéristique de celle-ci, et il faut renseigner un nombre équivalent de modèles détaillés. Nous considérerons donc, à un niveau donné d'agrégation spatiale, le numéro d'ordre de la ressource qui la distingue au sein d'un ensemble de ressources de même niveau.

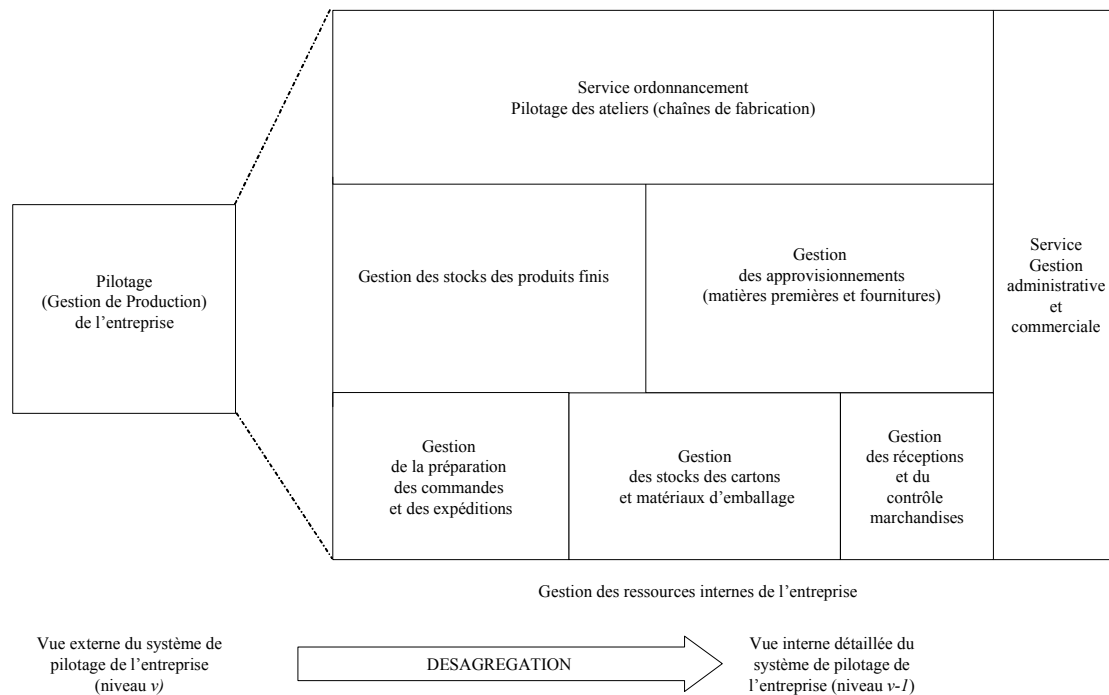


Figure 3.10 – Désagrégation spatiale du référentiel tridimensionnel du système de pilotage : implantation des services d'exploitation

L'axe temps permet d'observer la dynamique du système. Il distingue ainsi les différents niveaux décisionnels, caractérisés chacun par un couple Horizon / Période propre à une problématique de décision. Nous rappelons que l'horizon détermine la durée de la portée de la décision, la longueur de l'horizon devant être supérieure à l'intervalle de temps nécessaire à l'accomplissement des activités décisionnelles prises en considération sur cet horizon. La période est l'intervalle de temps au bout duquel les décisions prises sur l'horizon considéré sont remises en cause. La désagrégation temporelle s'effectue de telle sorte que la période d'un niveau donné n devient horizon du niveau immédiatement inférieur $n-1$ (Figure 3.11).

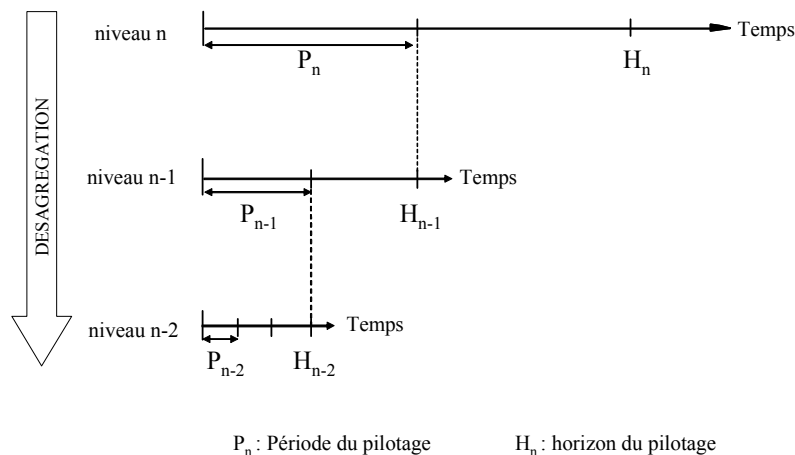


Figure 3.11 – Désagrégation temporelle du référentiel tridimensionnel du système de pilotage

L'axe des fonctions ne considère maintenant que les fonctions de conduite, puisque le modèle se consacre à l'étude de la partie pilotage d'un système de production. Néanmoins, cet axe comporte plusieurs degrés de granularité fonctionnelle (Figure 3.12) :

- Au niveau le plus agrégé *K3*, il s'agit de la fonction Gestion de la Production au sens le plus large, dont le but est d'optimiser la transformation des matières en fonction du carnet de commandes, des contraintes et objectifs de l'entreprise ;
- A un degré de description immédiatement inférieur, on considère les trois fonctions de conduite génériques de la gestion de production (GP, GR et PL) (cf. Chapitre 1, § 4.2.1.1) ;
- Au niveau encore inférieur, les trois fonctions GP, GR et PL sont représentées de manière plus détaillée par l'identification des processus de pilotage. C'est l'objet des réseaux GRAI que de disséquer toutes les activités exécutées dans les trois fonctions GP, GR et PL afin de préciser les mécanismes de prise de décision et d'analyser la synchronisation entre les activités [Doumeingts, 1984].

La décomposition fonctionnelle des modèles est en fait régie par les rapports récursifs entre activités et processus : une activité est en tant que telle la désignation agrégée d'un processus. Un processus est la vue détaillée d'une activité. Il est constitué d'un ensemble d'activités de niveau inférieur. Lorsque l'on désigne une fonction, il faut donc la qualifier d'un indentifiant sémantique (niveau d'agrégation fonctionnelle) et d'un indentifiant cardinal (numéro d'ordre de la fonction dans un ensemble de fonctions de même niveau).

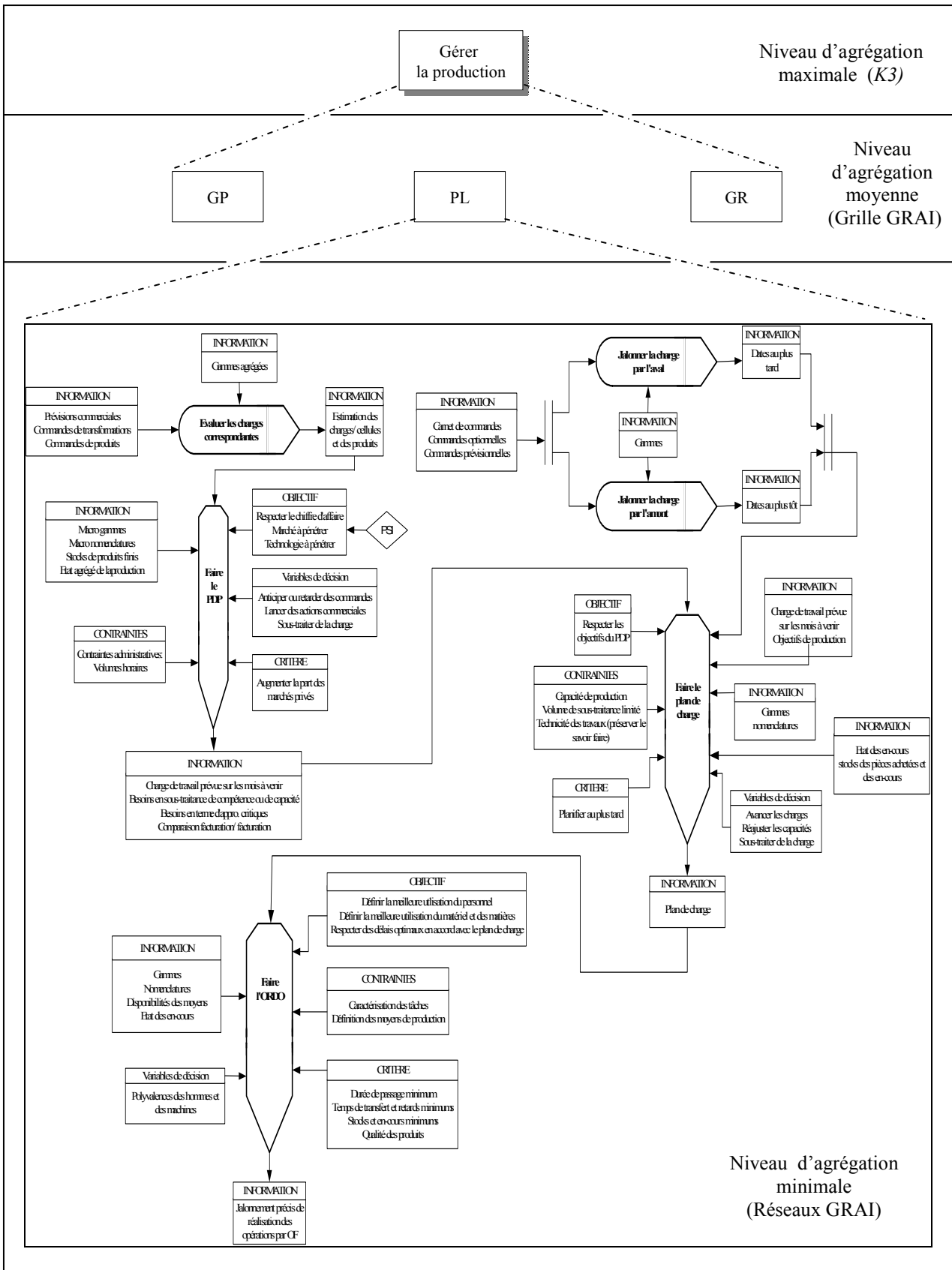


Figure 3.12 – Désagrégation du modèle du système de pilotage selon l’axe des fonctions : passage de la grille GRAI aux réseaux GRAI

3.3.2. Traçabilité de modélisation, codification des modèles

La modélisation du système de pilotage dans ses différentes échelles de représentation fonctionnelle, spatiale et temporelle, amène à considérer les différentes vues des entités composant le système de conduite. Ces entités de pilotage sont modélisées fonctionnellement et / ou organiquement, et le modèle de chaque entité est positionné dans le référentiel (*espace, temps, fonction*) selon le degré d'agrégation considéré. Chaque modèle est donc propre à une composante déterminée plus ou moins intégrée du système de pilotage, et fournit une représentation plus ou moins complète (fonctionnelle ou organique) de cette composante.

Les coordonnées des modèles dans le référentiel tridimensionnel constituent une codification des vues du système de pilotage, qui peut présenter un intérêt quant à l'archivage de ces vues (notamment pour des projets futurs de ré-ingénierie) et à la qualification de la documentation relative au système modélisé.

Dans le référentiel tridimensionnel (*espace, temps, fonction*), chaque modèle est identifié suivant :

- Son niveau d'agrégation spatiale v et son numéro d'ordre r pour le niveau d'agrégation considéré, avec :

$$1 \leq v \leq K1$$

$$1 \leq r \leq R^v$$

$$v, r, K1, R^v \in \mathfrak{K}$$

$K1$ et R^v représentent respectivement le nombre de pas d'agrégation réalisables suivant l'axe des espaces et le nombre de ressources manipulées au niveau v .

Toute ressource est dès lors désignée par le couple (r, v) , qui codifie par ailleurs le modèle *externe* de la ressource r de niveau v . La vue *interne* de la ressource (r, v) fait apparaître l'ensemble des ressources constitutives au niveau inférieur, c'est à dire $\mathfrak{R}_r^{v,v-1}$.

$\mathfrak{R}_r^{v,v-1} = \{(r', v-1)\}$ ensemble des ressources internes à la ressource (r, v) , avec :

$$\text{card } \mathfrak{R}_r^{v,v-1} = R^v$$

$$1 \leq r' \leq R^{v-1}$$

- Son degré d'abstraction temporelle n , avec :

$$1 \leq n \leq K2$$

$$K2 \in \mathfrak{K}$$

$K2$ représente le nombre de pas d'agrégation réalisables suivant l'axe des temps.

H^n est l'horizon du niveau décisionnel n .

P^n est la période du niveau décisionnel n .

K^n est le nombre de périodes du niveau n .

- Son échelle d'agrégation fonctionnelle f et son numéro d'ordre g pour le niveau d'agrégation considéré, avec :

$$1 \leq f \leq K3$$

$$1 \leq g \leq G^f$$

$$f, g, K3, G^f \in \mathfrak{X}$$

$K3$ et G^f représentent respectivement le nombre de pas d'agrégation réalisables suivant l'axe des fonctions et le nombre de fonctions du niveau f .

$G_g^{f,f-1} = \{(g', f-1)\}$ ensemble des fonctions ou activités internes à la fonction (f, g) , avec :

$$\text{card } G_g^{f,f-1} = G^f$$

$$1 \leq g' \leq G^{f-1}$$

Dès lors, chaque modèle est situé dans le référentiel tridimensionnel par le triplet $\begin{pmatrix} (r, v) \\ n \\ (g, f) \end{pmatrix}$.

Une telle codification permet de mettre en œuvre un principe de traçabilité de la modélisation du système de pilotage. La norme ISO 8402 [AFNOR, 1994] définit en effet la traçabilité comme « l'aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées ». On fournit ainsi des éléments de structuration de la documentation accessible aux analystes, par le balisage de la navigation d'un modèle à l'autre au fur et à mesure des scénarios de réingénierie, de leur validation à la mise en œuvre des modifications.

3.4. Mécanismes d'agrégation du modèle du système de pilotage

Nous présentons ici les vues issues de projections et de coupes du référentiel tridimensionnel introduite au § 2.2, en les particulierisant à l'objet de la modélisation : le système de pilotage de la Gestion de Production.

3.4.1. Coupes

Une coupe est la vue en deux dimensions d'un modèle 3D obtenue en fixant l'une des trois coordonnées (espace, temps, fonction) du référentiel.

Une coupe perpendiculaire à l'axe fonction engendre un plan (*espace, temps*) décrivant la réalisation d'une fonction ou d'une activité particulière dans le temps et dans l'espace (Figure 3.13).

Ce type de représentation était utilisé dans [Fénié, 1994] pour identifier les fonctions de planification, de conduite et de suivi dans le but de modéliser le système d'exploitation d'un système de production. S'agissant ici de la modélisation du système de pilotage, nous mettons en évidence les plans propres à chacune des trois fonctions de base du pilotage en gestion de Production : Gérer les Produits, Gérer les Ressources, et Planifier.

Le plan Gérer les Produits est utilisé pour décrire l'organisation des services en charge du calcul des besoins, des achats, du suivi des approvisionnements et de la gestion des stocks. Le plan Gérer les Ressources est une représentation de l'organisation des services de maintenance, de gestion du personnel, de suivi des disponibilités des équipements et des hommes. Enfin, le plan Planifier permet la représentation de l'organisation du service

planification / ordonnancement. Ces différents plans peuvent aider à l'analyse des différentes organisations réalisant la gestion de la production, tout particulièrement lors des études préparatoires à la mise en place au sein de l'entreprise d'outils ERP (Enterprise Resource Planning)³³.

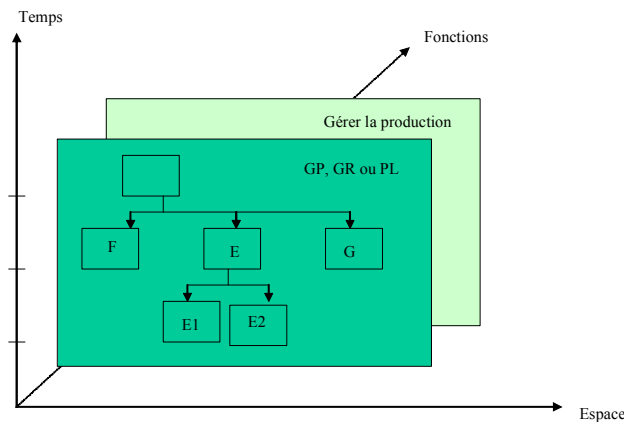


Figure 3.13 - Coupes 2D parallèles au plan (*espace, temps*) : Modèles organiques de pilotage

Une coupe perpendiculaire à l'axe Espace engendre une représentation dans le plan (*fonction, temps*) du système de pilotage, et ce pour une échelle spatiale fixée. Une grille GRAI relative à la conduite d'unités de production plus ou moins agrégées (ateliers, usines, etc.) est un modèle de ce type (Figure 3.14).

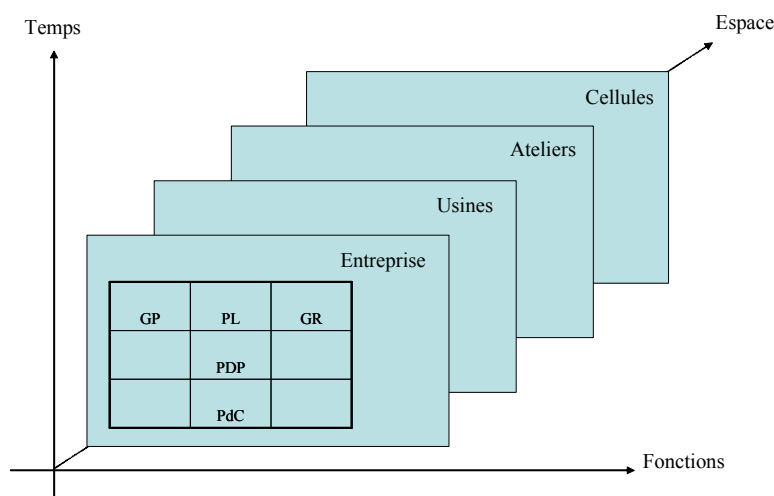


Figure 3.14 - Coupes 2D parallèles au plan (*fonctions, temps*) : Modèles fonctionnels de systèmes de pilotage

Enfin, une coupe parallèle au plan (*espace, fonction*) permet de sélectionner un niveau décisionnel particulier pour une description conjointement fonctionnelle et organique du système (Figure 3.15). Une telle description détaille les tâches mises en œuvre par chaque

³³ L'objectif majeur des ERP ou processus de Gestion Industrielle Intégrée 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 de l'entreprise.

fonction, mais aussi leur réalisation par des ressources bien déterminées. Une telle coupe permet donc d'identifier les activités exécutées à un niveau décisionnel choisi, lui-même associé à un couple horizon / période. On réalise ainsi une cartographie des *processus* de pilotage de l'entreprise³⁴ et des organisations mises en œuvre pour les réaliser, et ce pour des niveaux de planification bien déterminés (PDP, planification, ordonnancement).

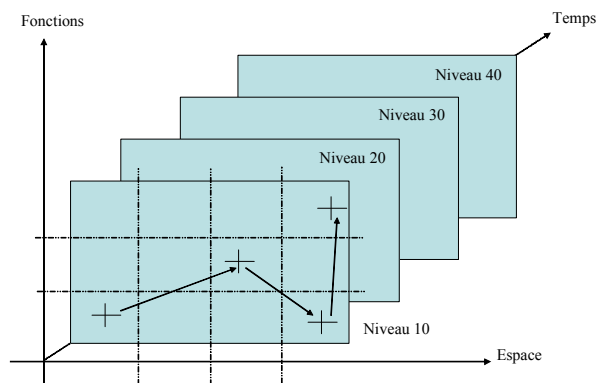


Figure 3.15 : Coupes 2D parallèles au plan (*espace, fonction*) : Modélisation par niveaux de pilotage

3.4.2. Projections

La projection d'un espace 3D sur un plan 2D fournit une représentation partielle du système, ignorant à dessein l'une des trois dimensions. Deux projections sont appropriées aux attentes des analystes : la projection suivant l'axe des espaces, qui fournit un modèle fonctionnel du système de pilotage, et la projection suivant l'axe des fonctions, qui fournit un modèle organique du système de pilotage.

Ces deux approches « orthogonales » de modélisation du système de pilotage sont à la base, respectivement, du modèle GRAI et du modèle par centres de conduite issus du laboratoire. Nous indiquons ci-après la méthodologie de mise en œuvre, face à un cas, de ces outils génériques de modélisation.

3.5. Méthodologie d'instanciation des modèles fonctionnel et organique du système de pilotage

3.5.1. Instanciation du modèle fonctionnel GRAI

Le modèle GRAI met en évidence les trois fonctions GP, GR et PL suivant les différents niveaux décisionnels du système. Toutefois, la modélisation fonctionnelle du système de pilotage requiert les liens entre les différentes entités des modèles (grille et réseaux GRAI). Il faut donc identifier l'ensemble des interactions entre ces entités, afin de reconstruire complètement le plan de modélisation fonctionnelle. Il faut ainsi considérer non seulement les liens informationnels, mais aussi les liens décisionnels ou cadres de décision, comprenant les objectifs de la décision (i.e. performances attendues), les éléments sur lesquels il est possible de « jouer » (i.e. variables de décision), les valeurs limites des variables de décision (i.e. contraintes), et les résultats des actions passées (i.e. indicateurs de performance) [Doumeingts et al, 1998]. Le tableau 3.1 permet aux analystes de recenser tous les liens émis et reçus par chaque centre de décision.

³⁴ Voir aussi [Deschamps et al, 2004] pour une modélisation des processus de l'entreprise.

	Cadre(s) de décision reçu(s)	Propriétés du ou des centre(s) émetteur(s)	Nom Niveau décisionnel Fonction
ENTREES			
d'un centre de décision	Flux informationnel(s) reçu(s)	Propriétés du ou des centre(s) émetteur(s)	Nom Niveau décisionnel Fonction
	Cadre(s) de décision envoyé(s)	Propriétés du ou des centre(s) récepteur(s)	Nom Niveau décisionnel Fonction
SORTIES			
d'un centre de décision	Flux informationnel(s) envoyé(s)	Propriétés du ou des centre(s) récepteur(s)	Nom Niveau décisionnel Fonction

Tableau 3.1 - Relations entre les différents centres de décision du modèle fonctionnel, adapté de [Roboam, 1993]

Des tests de cohérence doivent ensuite être réalisés. Ceux-ci ont été proposés par Doumeingts [Doumeingts et Ducq, 2000] et se présentent pour l'essentiel comme suit ³⁵ :

- Aucun cadre de décision ne doit "enjamber" plus d'un niveau décisionnel.
- Un centre de décision ne peut recevoir de cadre de décision que d'un seul autre centre de décision, excluant ainsi la possibilité de recevoir des objectifs contradictoires.
- On ne peut avoir de cadre de décision "inter- fonctions" que si les éléments de base de la fonction du centre de décision récepteur sont inclus dans les éléments de base de la fonction du centre de décision émetteur.

La validation de ces tests permet d'assurer la coordination entre tous les centres de décision de la grille GRAI. Il faut finalement compléter celle-ci en y insérant deux colonnes regroupant les informations nécessaires aux centres de décision : l'une regroupe toutes les données exogènes au système de production (informations externes) ; l'autre prend en compte l'ensemble des données provenant du système physique, qui permettent de connaître l'état de ce dernier (informations internes).

3.5.2. Méthodologie d'instanciation du modèle organique par centres de conduite

Le plan organique permet de représenter l'architecture de centres de conduite, i.e. l'ensemble des ressources manipulées par le système, et ce à chaque niveau décisionnel. Ce faisant, ici encore, les liens entre les différentes entités (centres de conduite) du modèle obtenu ne sont pas spécifiés. En conséquence, nous proposons, ci-après, une procédure permettant d'identifier tous les liens entre les différentes entités du modèle organique (liens hiérarchiques et liens de coopération), mais aussi de tester la cohérence globale des modèles et données relatifs aux différentes centres de conduite. On dispose ainsi d'une démarche structurée, multi – niveau, de modélisation assortie d'un jeu de tests assurant la *complétude* et la *cohérence* du modèle propre au cas analysé. Cette procédure, présentée sous la forme d'un organigramme, est générique et peut s'appliquer quel que soit le cas d'étude (Figure 3.16).

³⁵ L'ensemble des règles de cohérence de la modélisation GRAI est décrit plus en détail dans l'annexe 2.

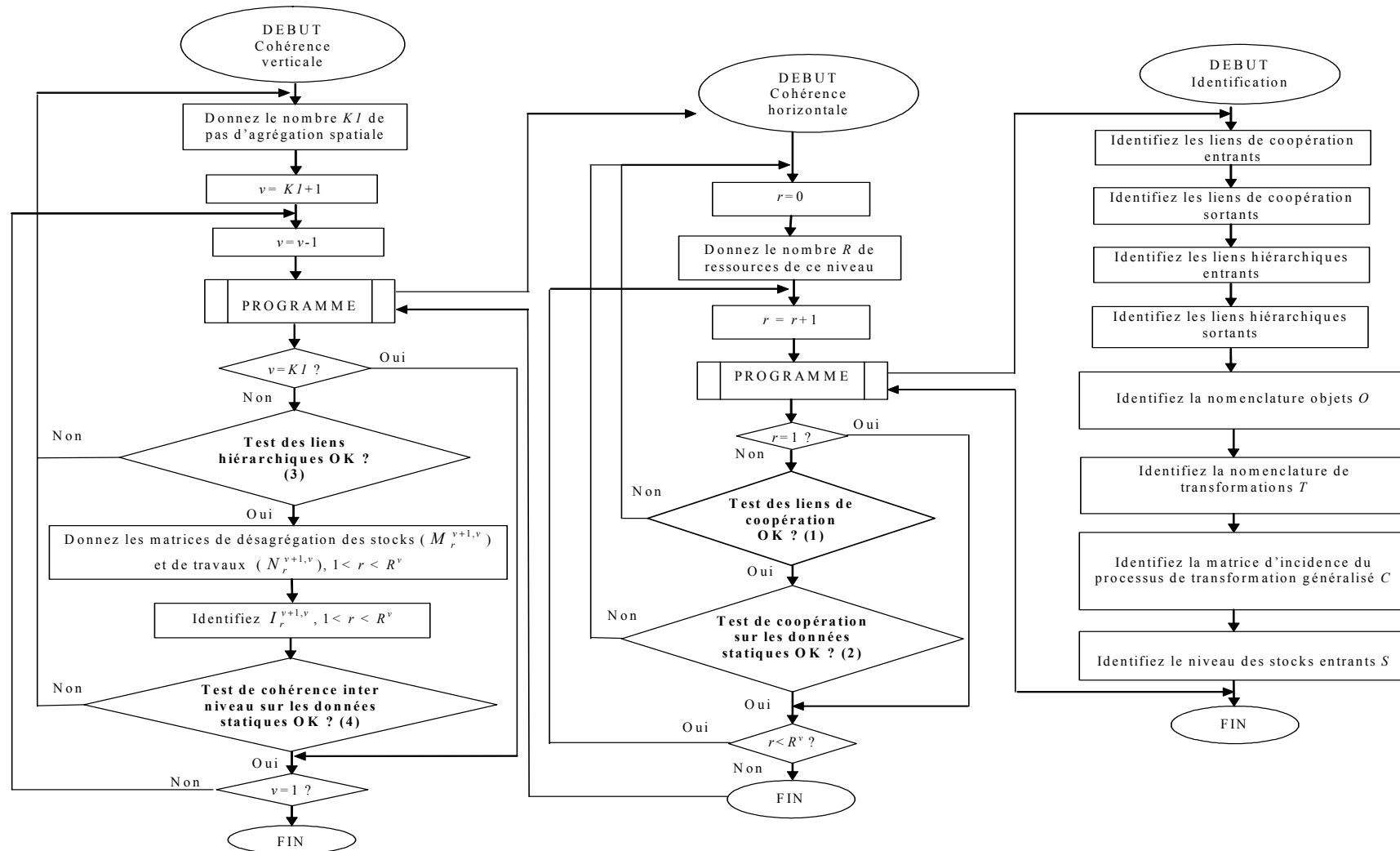


Figure 3.16 – Méthodologie d'instanciation de la vue organique du système de pilotage (modélisation par centres de conduite) [Spérandio et al, 2004a]

Nous décrivons ci-dessous le détail des tests réalisés dans l'organigramme.

(1) Test sur les liens de coopération

Ce test permet de valider la syntaxe du modèle en ce qui concerne la coopération des centres de conduite d'un même niveau. Il y a deux types de relations de coopération : une relation de coopération donneur d'ordres / sous-traitant (*DOC / STC*), et une relation de coopération client / fournisseur (*CC / FC*).

Soit $L_{x \rightarrow y}$ le lien de coopération du centre x vers le centre y . Alors $L_{x \rightarrow y} = 0$ si pas de lien entre x et y , et $L_{x \rightarrow y} = 1$ dès qu'un lien existe entre x et y . Les liens de coopération entre les R^v centres de conduite du niveau v doivent respecter les relations suivantes :

$$\sum_{r=1}^{R^v} L_{DOC \rightarrow STC}(r, v) = \sum_{r=1}^{R^v} L_{STC \rightarrow DOC}(r, v) \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^{R^v} L_{CC \rightarrow FC}(r, v) = \sum_{r=1}^{R^v} L_{FC \rightarrow CC}(r, v) \quad (2)$$

(2) Test sur les données statiques entre centres de conduite d'un même niveau

Ce test permet de vérifier que les données statiques (nomenclatures de produits et gammes de transformation) propres à chaque acteur d'une chaîne de valeur ajoutée sont cohérentes entre elles, en d'autres termes qu'il y a correspondance entre la vue globale d'un réseau d'acteurs et l'association des vues locales propres aux acteurs. Soient :

- (r, v) une ressource agrégées, vue externe d'un réseau d'acteurs
- $(r', v-1)$ et $(r'', v-1)$ deux ressources internes, constitutives du réseau (r, v)
- $O_{r'}^{v-1}$ la nomenclature objets de la ressource $(r', v-1)$, avec $\text{card}(O_{r'}^{v-1})=w$
- $O_{r''}^{v-1}$ la nomenclature objets de la ressource $(r'', v-1)$, avec $\text{card}(O_{r''}^{v-1})=w'$
- $q = \text{card}(O_{r'}^{v-1} \cap O_{r''}^{v-1})$ le nombre de références redondantes dans la nomenclature $O_r^{v,v-1}$. Il y a donc $w + w' - q$ références non redondantes dans cette nomenclature.
 - $C_{r'}^{v-1}$ la matrice d'incidence du processus de transformation généralisé de la ressource r' au niveau $v-1$
 - $C_{r''}^{v-1}$ la matrice d'incidence du processus de transformation généralisé de la ressource r'' au niveau $v-1$
 - $K_{r',r''}^{v-1}$ la matrice de couplage définissant le mode d'association des processus de r' et r'' (association série, parallèle, etc.).

Le test sur les données statiques entre centres de conduite d'un même niveau est alors validé si l'égalité suivante est respectée [Lecompte, 2001] :

$$C_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} C_{r'}^{v-1} & K_{r',r''}^{v-1} \\ 0 & *C_{r''}^{v-1} \end{bmatrix}$$

* $C_{r''}^{v-1}$ est obtenue en effaçant dans $C_{r''}^{v-1}$ les q lignes relatives aux références redondantes.

(3) Test sur les liens hiérarchiques

Ce test permet de valider la syntaxe du modèle en ce qui concerne la hiérarchisation des centres de conduite de plusieurs niveaux. Il y a deux types de relations de hiérarchie : une relation hiérarchique donneur d'ordres / sous-traitant (*DOH / STH*), et une relation hiérarchique client / fournisseur (*CH / FC*). Les liens hiérarchiques sont à sens unique. Le retour d'information allant des centres de conduite receveurs vers le ou les centres de conduite émetteurs est ici laissé implicite.

Les règles de cohérence des liens hiérarchiques entre des centres de conduite de deux niveaux consécutifs v et $v-1$ sont les suivantes :

1) *Si un centre de conduite du niveau v est un donneur d'ordres hiérarchique, au moins un centre de conduite du niveau $v-1$ doit recevoir un lien hiérarchique de commande de transformations.*

2) *Si un centre de conduite du niveau v est un client hiérarchique, au moins un centre de conduite du niveau $v-1$ doit recevoir un lien hiérarchique de commande de produits.*

3) *Tout centre de conduite du niveau $v-1$ interne à une ressource (r, v) doit recevoir un lien hiérarchique.*

(4) Test sur les données statiques entre centres de conduite de niveaux différents

Ce test permet de vérifier les mécanismes d'agrégation / désagrégation des données statiques relatives à plusieurs centres de deux niveaux v et $v-1$.

Toute transformation d'un niveau v peut se désagréger en un processus de niveau $v-1$, engendrant de nouvelles transformations. Les travaux désagrégés sont alors proportionnels aux travaux agrégés dont ils dérivent [Lecompte, 2001] :

$$W_r^{v,v-1} = N_r^{v,v-1} W_r^v \text{ avec } N_r^{v,v-1} \text{ matrice de désagrégation des travaux}$$

De la même manière, chaque objet du niveau v représente un ensemble d'objets de niveau $v-1$, et les objets désagrégés sont proportionnels aux objets agrégés dont ils dérivent [Lecompte, 2001]:

$$\overline{\Delta S_r^{v,v-1}} = M_r^{v,v-1} \Delta S_r^v$$

avec $M_r^{v,v-1}$ matrice de désagrégation des nomenclatures objets et $\overline{\Delta S_r^{v,v-1}}$ vecteur stock des objets de la nomenclature de niveau $v-1$ dérivée de la nomenclature des objets de niveau v .

Le test sur les données statiques entre centres de conduite de niveaux différents est validé si l'équation suivante est respectée [Lecompte, 2001] :

$$M_r^{v,v-1} C_r^v = I_r^{v,v-1} C_r^{v,v-1} N_r^{v,v-1}$$

La modélisation organique et l'ensemble des tests de cohérence (horizontale et verticale) d'un système ne sont donc possibles que si celui-ci existe, ou tout du moins que sa conception soit suffisamment aboutie en termes de spécifications de réalisation. La modélisation opérationnelle qui suit permet de décrire, quand la structure construite est « stable », les processus et modes opératoires mis en œuvre dans le système.

3.5.3. Modélisation opérationnelle

Nous rappelons que le modèle opérationnel s'adresse à l'exploitation du système. Il rend compte, dans le contexte implicite d'une réalisation organique, des éléments de variabilité gérés en exploitation, c'est-à-dire des données techniques dynamiques : état des centres de charge (postes, ateliers, usines), des ressources de transport (intra et inter centres de charge), et des stocks (eux-mêmes (intra et inter centre de charge)).

Chaque centre de conduite identifié dans la structure du système, quel que soit son niveau hiérarchique, est amené à effectuer la décomposition des tâches qui lui sont affectées en sous-tâches à allouer aux ressources internes (ressources propres) et/ou externes (sous-traitants). Pour cela, il effectue un calcul de besoin (en fournitures) et/ou de charge (estimation des travaux de transformation à réaliser), puis alloue les travaux aux ressources. Naturellement, tout scénario d'allocation doit s'assurer du respect de contraintes diverses telles que :

- Contrainte de couverture des travaux ;
- Contraintes de gamme pour chaque produit ;
- Contraintes de capacité des ressources de transformation pour chaque période de temps ;
- Contraintes de capacité des ressources de transport pour chaque période de temps ;
- Contraintes d'approvisionnement.

L'espace de décision propre à tout centre de décision est ainsi caractérisé, permettant à tout décideur de faire des choix cohérents avec les objectifs poursuivis par l'organisation.

L'instanciation du modèle opérationnel à partir du modèle organique par centres de conduite consiste (Figure 3.17) à renseigner chaque centre (r, v) pilotant la ressource r de niveau v , avec, en référence aux notations introduites au § 3.3.2, $(1 \leq r \leq R), (1 \leq v \leq K1)$ et $r, v, R, K1 \in \mathbb{N}$.

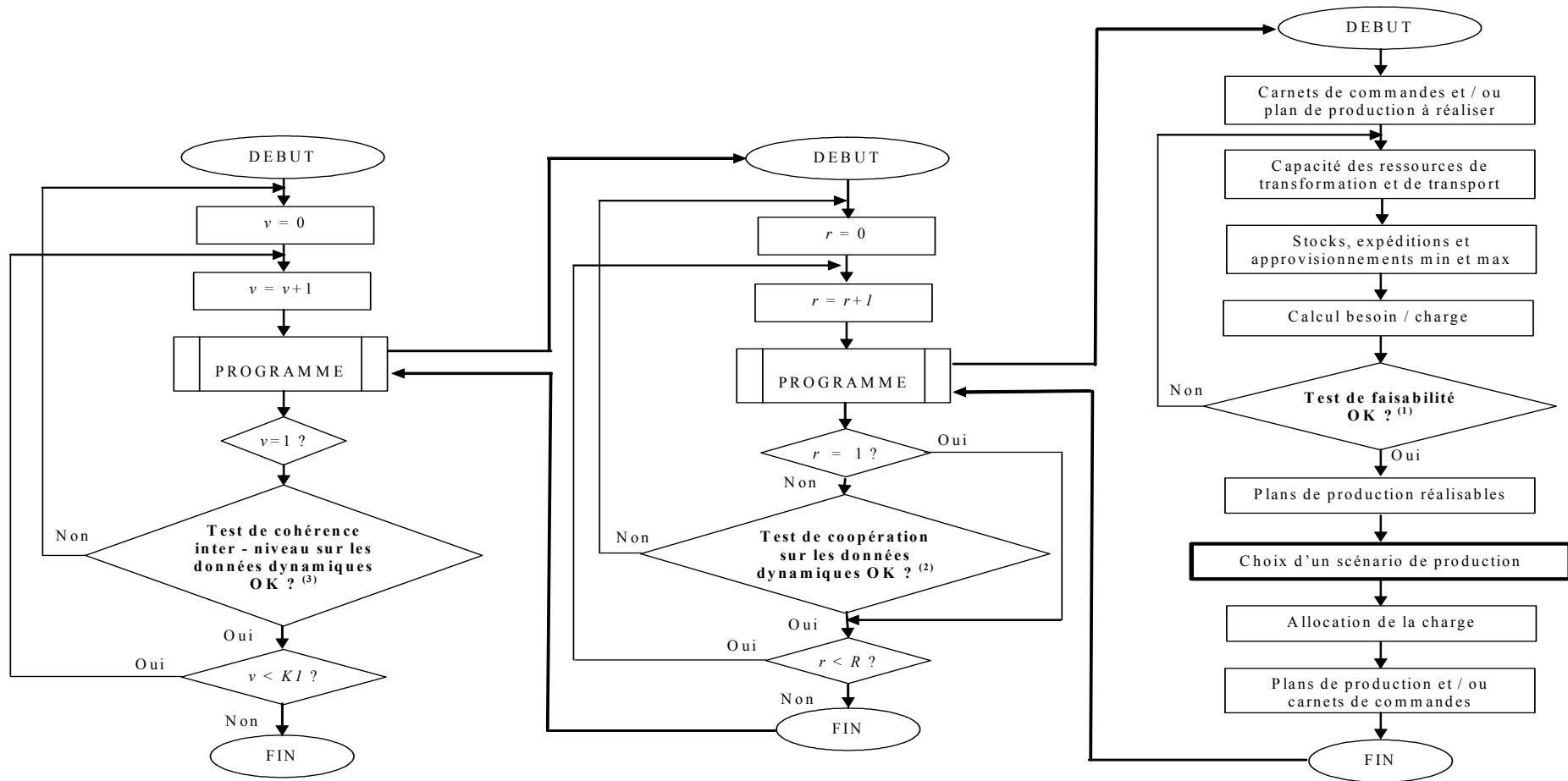


Figure 3.17 – Procédure de modélisation opérationnelle par centres de conduite [Spérandio et al, 2004a]

Nous commentons ci-dessous les tests mentionnés dans la Figure 3.18 :

(1) Test de faisabilité des scénarios de production

Ce test permet de vérifier que les scénarios proposés sont concevables, c'est-à-dire que :

- Les carnets de commande ou plans de production initialement prévus sont effectivement réalisables ;
- Les capacités des ressources de transformation et de transport englobent les charges de travail allouées ;
- Les contraintes (logiques, physiques et de régulation) des stocks sont respectées.

(2) Test sur les données dynamiques entre centres de conduite d'un même niveau

Ce test permet de vérifier :

- les contraintes de précédence entre tâches ;
- les capacités des opérateurs (ressources de transformation et / ou de transport) ;
- la conservation du flux de matière entre les différents centres de conduite.

(3) Test sur les données dynamiques entre centres de conduite de niveaux différents

Ce test permet de vérifier que les données agrégées manipulées par un centre de conduite sont cohérentes avec les données détaillées réparties sur les centres de conduite du niveau inférieur. Il s'agit de valider la coordination du déploiement des activités (de production et de sous-traitance), les approvisionnements effectués, la réalisation des travaux désagrégés et les expéditions qui en découlent, tout cela sur une période de temps prédéfinie. Enfin, il faut analyser la cohérence des niveaux de stocks perçus au niveau agrégé et, respectivement, au niveau détaillé.

L'ensemble de ces tests est détaillé dans [Lecompte, 2001].

3.6. Synthèse

La modélisation du système de pilotage d'une organisation de production vise, comme tout exercice de modélisation, à fournir une représentation plus ou moins agrégée du système en présence et orientée selon les besoins de l'analyste. Nous avons montré comment les différentes vues se positionnent et s'interfacent dans un référentiel tridimensionnel de modélisation (espace, temps, fonction) qui s'avère être aussi un référentiel d'agrégation. La modélisation est multi – niveau, au sens où l'on procède par raffinements successifs de modèles agrégés, ou, au contraire, par construction progressive d'un modèle agrégé à partir de données détaillées que l'on aura préalablement rassemblées. La modélisation multi – niveau est basée sur un principe de composition / décomposition de modèles, sur chacun des trois axes (espace, temps, fonction) du référentiel d'agrégation. Nous avons mis en avant une analogie entre agrégation fonctionnelle et agrégation organique qui est, à chaque pas d'agrégation, de mettre en correspondance une entité agrégée de modélisation, avec un jeu d'entités similaires constitutives, à un niveau plus détaillé, de l'entité agrégée. La décomposition opérée amène donc à considérer la *cardinalité* des entités de modélisation fine observées par effet de zoom. Mais la décomposition de modèle agrégé serait incomplète si l'on ne considérait pas les *liens* entre les entités de modélisation détaillée.

Ceci vaut pour la décomposition fonctionnelle, qui, à une fonction agrégée, fait correspondre un processus inter reliant des fonctions plus détaillées.

Ceci vaut également pour la décomposition organique, qui, à une organisation spatiale vue comme une entité agrégée, fait correspondre une organisation interne inter reliant des unités plus fines.

Ces principes de modélisation multi – niveau permettent à l’analyste d’accorder la finesse des modèles à ses besoins. On remarquera l’analogie avec la décomposition récursive des graphes qui permet de voir en tout sommet d’un *graphe* une représentation agrégée d’un sous – graphe non détaillé à ce niveau, et, réciproquement, de considérer tout graphe comme la vue détaillée d’un sommet d’un graphe de niveau d’agrégation supérieur.

C’est sur ces principes que nous avons proposé une démarche de modélisation conduisant à identifier, d’une part, les entités de modélisation de chaque niveau, et, d’autre part, les liens entre ces entités, sans oublier les règles qui permettent de tester la cohérence des modèles obtenus. Appliqués à la modélisation fonctionnelle (grille et réseaux GRAI) et à la modélisation organique (réseaux de centres de conduite), ces éléments méthodologiques de modélisation multi – niveau du système de pilotage sont résumés ci-dessous (Figure 3.18).

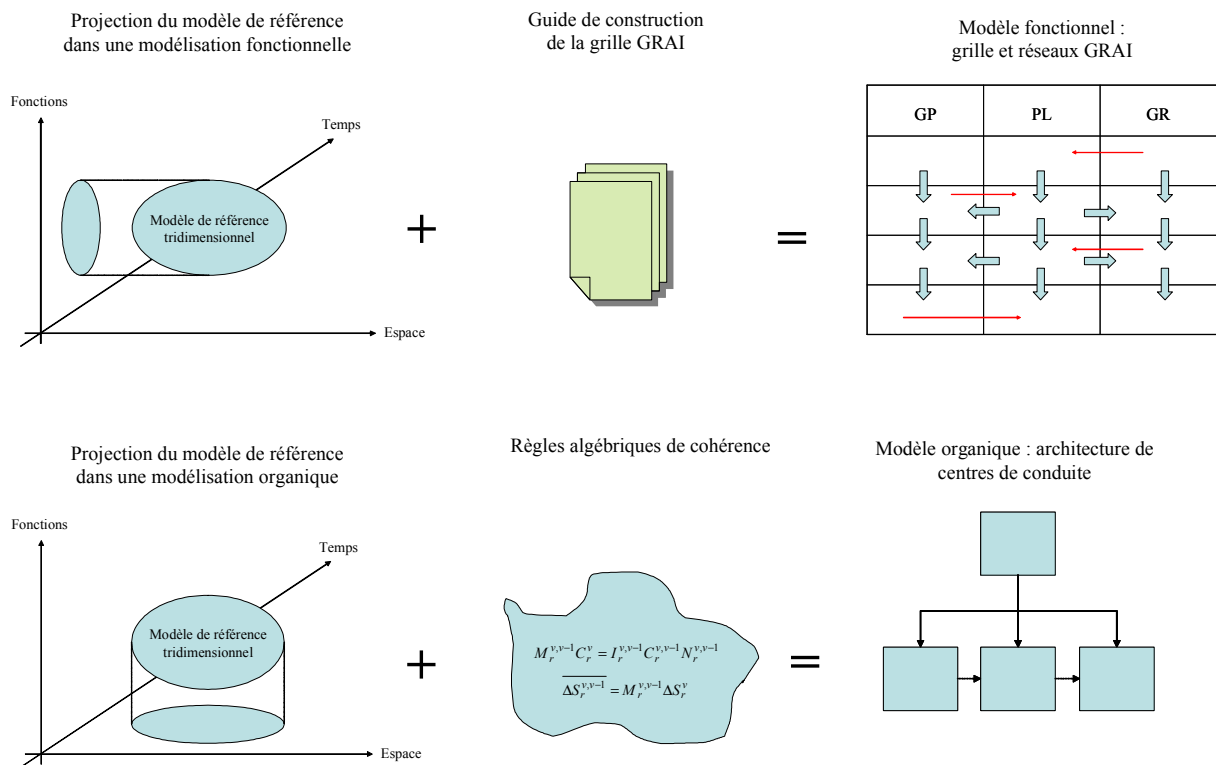


Figure 3.18 – Finalisation des modèles fonctionnel et organique

4. CONCLUSION

A cours de ce chapitre, nous avons proposé un modèle de référence tridimensionnel visant à situer le modèle d'une entreprise suivant trois dimensions : l'espace (réalisations organiques du système), le temps (dynamique et variabilité du système) et les fonctions (rôles et processus mis en œuvre). Ce référentiel permet, par l'articulation des vues fonctionnelle et organique, de reconstruire l'interprétation fonctionnelle des réalisations organiques propres au cas d'étude. Par ailleurs, toute modélisation étant en soi nécessairement tributaire d'une vue agrégée du système, nous avons associé au modèle les niveaux d'agrégation (i.e. les distances au réel) de la représentation manipulée, afin d'aider les analystes à naviguer dans la base de modèles.

Le modèle de référence tridimensionnel, appliqué au système de pilotage, combine la vue fonctionnelle du modèle de conduite GRAI [Doumeingts, 1984] à la vue organique basée sur le concept de *centre de conduite* développée au laboratoire [Lecompte, 2001]. Le modèle obtenu rend possible la description du système de pilotage à toute échelle du temps et de l'espace, et ce pour la mise en œuvre de toute fonction (détaillée ou non) de la gestion de production. Il permet d'examiner les rapports entre les structures de pilotage et les fonctions qui les justifient.

Nous avons appliqué ces principes de modélisation à un cas d'étude dont on trouvera le détail dans l'annexe 1.

CONCLUSION DE LA PARTIE 1

La première partie de ce mémoire s'est attachée à décrire en premier lieu la problématique actuelle de production et à analyser les principaux cadres de modélisation d'entreprise reconnus dans le domaine scientifique. Cette étude a permis d'appréhender le système de production:

- par une modélisation fonctionnelle, qui rappelle ses finalités, sans préjuger des modalités de réalisation ;
- par une modélisation organique, qui décrit une architecture répondant aux objectifs fonctionnels ;
- par une modélisation opérationnelle, qui décrit les modes opératoires d'exploitation de l'organisation du système.

Nous avons mis en évidence que peu de méthodes de modélisation proposent une approche prenant en compte simultanément les aspects fonctionnel et organique des systèmes. Le lien entre les vues fonctionnelle et organique, c'est-à-dire en quelque sorte entre macro et micro-modélisation du système de production, reste au demeurant peu explicite.

En conséquence nous avons proposé un modèle de référence tridimensionnel (espace, temps, fonction). Celui-ci rend possible la description du modèle du système de production à tout échelle du temps et de l'espace, et ce pour la mise en œuvre de toute fonction de la gestion de production. Ce modèle combine le modèle de conduite GRAI à la structuration organique du système de pilotage par 'centres de conduite' développée au laboratoire.

Puis, nous présenté la problématique de gestion de l'évolution du système de production et les travaux de référence sur ce sujet. En réponse aux évolutions de son environnement et de ses éventuels dysfonctionnements internes, un système de production doit en effet évoluer avec une importance plus ou moins grande, en agissant sur son organisation et / ou sur les produits fabriqués. La ré - ingénierie de tout ou partie du système de production et la conception de produits constituent alors les deux variables d'action de la gestion de l'évolution. Les approches de modélisation évolutionniste demeurent cependant qualitatives et ne semblent pas considérer le nuancement de la 'profondeur' de la remise en cause du système, en réalité fortement variable. Nous avons de ce point de vue tenté de conceptualiser l'impact des modifications en nous référant aux différents niveaux de spécification (opérationnelle, organique ou fonctionnelle) du système.

Partie

2

DE L'USAGE DES MODELES POUR LA GESTION DE
L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

INTRODUCTION A LA PARTIE 2 :

DE L'USAGE DES MODELES POUR LA GESTION DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

La gestion de l'évolution du système de production est une activité permanente de l'entreprise, et la ré-ingénierie, qui consiste à modifier tout ou partie du système, en constitue en quelque sorte le pilotage organisationnel. Le besoin en méthodologie est dans ce domaine aujourd'hui très important, et sous-tend la montée en puissance de la modélisation d'entreprise dans l'industrie. Encore faut-il disposer de modèles adaptés aux situations d'ingénierie, et c'est le sujet de cette deuxième partie que de montrer quel parti tirer de la modélisation multi - vue dans les différents contextes de ré-ingénierie rencontrés dans le cycle de vie du système. Celle-ci comprend deux chapitres.

Le chapitre 4 vise à éclairer l'usage qui peut être fait des modèles pour structurer la démarche d'ingénierie produit / système. La modélisation du système à reconcevoir ou réorganiser est en effet utile à l'analyste pour raisonner sur les différents scénarios de modification et pré évaluer leur impact sur les performances globales du système. Nous considérerons le pilotage de l'entreprise selon trois niveaux :

- Le pilotage stratégique, niveau le plus élevé de la gestion du cycle vie, qui, basé sur la veille stratégique, décide des projets de ré-ingénierie produit et / ou système à lancer. C'est sur la modélisation fonctionnelle que ce niveau de pilotage est amené à raisonner ;
- Le pilotage structurel ou pilotage des projets de ré-ingénierie, qui consiste à traduire un cahier des charges en spécifications techniques, puis à en commanditer la réalisation. Le modèle de référence est ici le modèle organique ;
- Le niveau de pilotage opérationnel, ou pilotage technique du système, en charge d'exploiter le système réel.

Nous considérons donc ces trois niveaux de pilotage comme constitutifs de la gestion du système de production du long terme à l'exploitation court terme. Dans ce chapitre, nous traiterons principalement de la reconception du système, mais montrerons la dualité de la reconception des produits en tant que variable d'action stratégique. Nous analyserons aussi l'usage des indicateurs de performance pour la gestion du cycle de vie des systèmes, et insisterons sur l'analyse de la criticité des indicateurs de performance, qui permet de définir les événements susceptibles de déclencher les décisions correctrices à chacun des trois niveaux de pilotage. Nous finirons par une présentation intégrée des trois niveaux de pilotage dans une formalisation unifiée : l'extension du modèle GRAI à la gestion de l'évolution d'un système de production.

Le chapitre 5 conclut ce mémoire par la prise en compte des informations requises par les niveaux de pilotage présentés au chapitre 4. Le pilotage de l'évolution d'une entreprise nécessite en effet de mettre à disposition des décideurs les informations leur permettant non seulement de prévoir et de choisir la stratégie à mettre en œuvre, mais aussi de contrôler la portée de la stratégie choisie. Dans un premier temps, nous dressons une typologie des

informations nécessaires et suffisantes à chacun des trois niveaux de pilotage. Mais ces informations doivent être présentées avec le juste niveau sémantique requis par le pilotage, ce qui nous amène à investiguer le processus de traitement des informations. Par analogie avec les flux matériels, nous parlerons de *logistique d'information* en vue du pilotage. Nous en proposerons une modélisation en rapport avec le modèle de conduite GRAI étendu à la gestion de l'évolution présenté au chapitre 4.

Chapitre

4

LA MODELISATION SUPPORT A LA GESTION
DU CYCLE DE VIE DU SYSTEME

Sommaire Chapitre 4

La modélisation support à la gestion du cycle de vie du système

1. INTRODUCTION	117
2. GESTION DU CYCLE DE VIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION BASEE SUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE MULTI-VUE	118
2.1. Gestion de l'évolution des systèmes de production	118
2.1.1. Niveaux de pilotage des systèmes de production	118
2.1.2. Synchronisation des cycles de vie système et modèle	119
2.2. Démarche méthodologique pour la gestion basée-modèle du cycle de vie du système	121
2.3. Conclusion	125
3. EXPRESSION DE LA PERFORMANCE	125
3.1. Notion d'indicateur de performance	125
3.1.1. Définitions	125
3.1.2. Classification	125
3.2. Systèmes d'indicateurs de performance	128
3.3. De l'usage des modèles et des indicateurs de performance pour la gestion du cycle de vie des systèmes de production	129
3.3.1. Modèles et indicateurs de performance pour la gestion stratégique	130
3.3.2. Modèles et indicateurs de performance pour la ré-ingénierie	131
3.3.3. Modèles et indicateurs de performance pour l'exploitation	132
4. ANALYSE DE CRITICITE ET GESTION DES EVENEMENTS	133
4.1. Introduction	133
4.2. Evénements de faible amplitude	135
4.3. Evénements d'amplitude moyenne	136
4.4. Evénements de forte amplitude	136
4.5. Conclusion	137

5. LE MODELE GRAI SUPPORT A LA CONDUITE DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	138
5.1. Introduction	138
5.2. Système de conduite multi-niveau pour l'évolution des systèmes de production	138
5.2.1. Définition des niveaux décisionnels	138
5.2.2. Définition des fonctions	139
5.2.3. Grille GRAI étendue à la gestion de l'évolution	141
5.3. Système de conduite pour la ré-ingénierie des systèmes de production	141
5.3.1. Evolutions couplées du produit et du système	142
5.3.2. Gestion de la performance en conception et ré-ingénierie	143
5.3.3. Conduite de la ré-ingénierie des systèmes de production	145
5.4. Synthèse	147
6. CONCLUSION	149

1. INTRODUCTION

L'entreprise est aujourd'hui confrontée à un environnement fortement variable, où l'accroissement de la concurrence associé aux exigences toujours plus fortes des clients confère un caractère de plus en plus éphémère aux activités industrielles. Afin de rester compétitive, l'entreprise doit renouveler sans cesse son offre de produits et de services, et se voit dans l'obligation d'adapter son outil productif aux exigences du marché. Il s'agit de maintenir la *fonction économique* (cf. chapitre 2, § 3.3.1) de l'entreprise par l'adaptation perpétuelle de l'offre (ré-ingénierie produit) et la modernisation continue de l'outil de production (ré-ingénierie système). Dans sa quête de meilleure réactivité au marché, l'entreprise voit en définitive son évolution guidée par, à la fois, des « besoins de pertinence » (adaptation de l'entreprise aux contraintes extérieures) et des « besoins de cohérence » (coordination interne de l'action collective) [Cohendet et Llerena, 1999].

L'objet de ce chapitre est double.

Il est, d'une part, d'éclaircir l'usage qui peut être fait des modèles pour structurer la démarche de gestion de l'évolution et de ré-ingénierie, et promouvoir ainsi la Modélisation d'Entreprise comme outil de raisonnement de pré-évaluation et de documentation des systèmes de production, à l'instar des approches orientées modèles (Model – Driven Approach) en cours de diffusion dans l'industrie du logiciel [Czarnecki and Helsen, 2003] [Drira, 2005] [Rashid et al, 2005].

Il est, d'autre part, de situer la démarche de gestion de l'évolution et de ré-ingénierie produit / système comme une activité récurrente relevant du pilotage de l'entreprise, venant, par une logique de projets ou par ajustement continu, moduler la structure du système physique et l'organisation de son exploitation, tout en ajustant l'offre en produits.

Ce faisant, nous considérerons le pilotage de l'entreprise selon trois niveaux :

- La gestion de l'évolution qui, basée sur la veille stratégique, décide des projets de ré-ingénierie produit et/ou système à lancer, en détermine le cahier des charges et les conditions financières,
- le pilotage des projets de ré-ingénierie, qui consiste à traduire un cahier des charges en spécifications techniques (après avoir évalué les solutions alternatives) puis à en commanditer la réalisation,
- l'exploitation du système de production, ou gestion de production.

C'est bien ainsi que l'entreprise doit aujourd'hui assurer sa pérennité : lier, au moyen des activités de ré-ingénierie, le pilotage stratégique et managérial à l'ajustement du pilotage opérationnel de l'exploitation de ses ressources. L'utilisation de modèles et la mise en œuvre d'un système d'indicateurs de performances est une tendance qui peu à peu pénètre les méthodes industrielles, permettant d'aider les analystes dans leur démarche de ré-ingénierie. Il convient en outre de recalibrer les modèles au fur et à mesure des réalisations pour servir de base aux ré-ingénieries futures.

En conséquence, ce chapitre se présente comme suit. Dans un premier temps, nous étudierons la place des activités de gestion de l'évolution et de ré-ingénierie dans le cycle de vie des systèmes de production, puis analyserons tous les éléments méthodologiques nécessaires au pilotage basé modèles. Nous montrerons ensuite l'importance des indicateurs de performance pour la gestion du cycle de vie des systèmes. Nous insisterons à ce propos sur l'analyse de la criticité des indicateurs de performance, qui permet de définir les événements susceptibles de déclencher les décisions correctrices à chacun des trois niveaux de pilotage.

2. GESTION DU CYCLE DE VIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION BASEE SUR LA MODELISATION D'ENTREPRISE MULTI-VUE

2.1. Gestion de l'évolution des systèmes de production

2.1.1. Niveaux de pilotage des systèmes de production

Nous considérons les différents niveaux de décision qui rythment le cycle de vie d'un système de production, suivant qu'il s'agisse de :

- mettre en œuvre des processus existants pour atteindre un objectif de production. Il s'agit du pilotage de processus structurés, qui correspond au pilotage technique³⁶ [AFGI, 1992] ;
- remettre en cause ces processus pour atteindre un objectif d'amélioration de la production. Il s'agit d'un pilotage concernant des processus semi – structurés ou non – structurés [El Mhamedi et al, 1997a]. Ce pilotage correspond au pilotage économique du système, et l'objectif à atteindre dans pareil cas est un objectif de progrès [CPC, 1997].

Au cours du chapitre 2, nous avons vu que la méthode GEM modélise l'évolution d'un système par un processus continu constitué d'une succession d'états : l'état Initial, l'état final ou Cible, et les états Etape. Malhéné, dans sa thèse, dégage ainsi la notion de gestion multi – niveaux, et propose un processus d'évolution sur trois niveaux [Malhéné, 2000].

Le premier niveau de GEM (cf. chapitre 2, § 3.2.1) vise à gérer le processus d'évolution à travers la définition des différents états Cible décrivant les objectifs et performances souhaitées du système futur, sans préjuger de son organisation. La définition de l'état Cible incombe à la gestion de l'évolution du système, qui détermine les orientations stratégiques du système dans son environnement.

Le niveau suivant de GEM consiste à définir les actions à entreprendre pour évoluer vers l'état Cible par l'intermédiaire d'états Etape. Il s'adresse donc aux activités de ré-ingénierie du système de production orientées vers la réalisation des objectifs définis par le niveau précédent.

Enfin, le troisième niveau de GEM consiste à interpoler les différentes Etapes. Il s'adresse à la réactualisation du niveau opérationnel, par des modifications mineures qui ne remettent pas en cause l'organisation du système.

En continuité avec la formalisation de GEM, et en relation avec la structuration fonctionnelle, organique et opérationnelle de la Modélisation d'Entreprise développée dans les chapitres précédents, nous considérerons que la gestion du cycle de vie du système de production résulte de l'imbrication de trois niveaux de pilotage: le pilotage stratégique (s'appuyant sur la modélisation fonctionnelle), le pilotage structurel (s'appuyant sur la modélisation organique) et l'exploitation (s'appuyant sur la modélisation opérationnelle).

- Le pilotage stratégique est le niveau le plus élevé de la gestion du cycle vie, en charge du maintien, du réhaussement ou de la mutation de la fonction économique (au sens donné chapitre 2 § 3.3.1). Les décideurs, à ce niveau, sont les dirigeants de l'entreprise. Ces décisions ne peuvent être que peu fréquentes, compte tenu des investissements requis et des délais de mutation. Il s'agit donc d'un pilotage de l'évolution sur le long terme. Concevoir de nouveaux produits et reconcevoir le système de production (reengineering) constituent les

³⁶ Voir chapitre 1, § 4.2.2.

deux principales variables d'action de ce niveau de pilotage. Dans ce chapitre, nous considérerons principalement la reconception du système, mais nous montrerons la dualité de la reconception des produits en tant que variable d'action stratégique. C'est naturellement sur la modélisation fonctionnelle que ce niveau de pilotage est amené à raisonner.

- Le pilotage structurel vise à modifier la réalisation du système de production et/ou des produits. C'est le pilotage du projet d'ingénierie, qui décline les objectifs fonctionnels du niveau stratégique en spécifications système et/ou produit. Le modèle de référence est ici le modèle organique qui rend compte de la réalisation d'une solution-système ou d'une solution-produit. Les décideurs à ce niveau sont les bureaux d'études qui analysent le système existant, et définissent les projets d'amélioration, sur la base de la capitalisation des projets passés. Beaucoup de changements s'inscrivent en effet dans la continuité des actions et décisions passées. « Les formes d'organisation apparaissant comme nouvelles s'enracinent souvent dans des expériences antérieures et s'articulent avec des formes qui, elles, restent stables » [Livian, 1998]. Le pilotage structurel est une activité pouvant s'échelonner du long terme (lancement peut fréquent de grands projets) au moyen terme (amélioration continue du système) (voir chapitre 2, § 3.1)

- Contrairement aux deux niveaux de pilotage précédents, qui raisonnent sur une définition future du système (en quelque sorte hors-ligne par rapport au système existant), le niveau de pilotage opérationnel du système s'attache à exploiter le système réel. Les acteurs à ce niveau sont les chefs d'ateliers, qui connaissent bien le fonctionnement de l'entreprise.

2.1.2. Synchronisation des cycles de vie système et modèle

Pour pouvoir ancrer la gestion du cycle de vie du système sur la Modélisation d'Entreprise, il faut disposer :

- De modèles de référence ;
- De formalismes ou langages de modélisation et des outils graphiques associés permettant de représenter les modèles et architectures de référence ;
- D'une démarche donnant un ensemble d'étapes à suivre pour converger vers une décision satisfaisant les objectifs.

Nous considérons trois modèles de référence :

- Un modèle de référence fonctionnel, qui décrit le comportement et les fonctionnalités du système ;
- Un modèle de référence organique, qui procure une description des ressources du système (ateliers, machines, stocks), ainsi que la dynamique des flux matériels et informationnels entre ces ressources ;
- Un modèle opérationnel du système, qui décrit le détail des modes opératoires mis en oeuvre.

La modélisation multi- vues permet :

- de pallier la complexité excessive d'une représentation exhaustive du système en considérant celui-ci selon plusieurs points de vues, afin de l'observer et de diagnostiquer ses points forts et ses faiblesses en rapport avec les attendus de l'analyse ; Les vues partielles du modèle ont été discutées au chapitre 3, § 2.2.
- de raisonner, au travers du modèle, sur le système réel. En interrogeant le modèle sur ce qui n'est pas directement mesurable, on cherche à évaluer une performance en quelque

sorte par simulation (théorie de l'observabilité ou « reconstruction d'état » des systèmes). Par exemple, il est souvent délicat de définir les ventes d'une entreprise à un horizon assez éloigné. Il faut donc effectuer des prévisions de vente, pour lesquelles différentes méthodes et modèles de simulation existent³⁷, en fonction des sources de données disponibles (historiques des ventes, études de marché, etc.) et du caractère (constant, saisonnier erratique etc.) de la consommation.

Les formalismes ou langages de représentation assurent l'écriture des modèles nécessaires. Ils proposent une description des concepts définis dans les modèles de référence, assortie de règles d'utilisation.

Enfin, la démarche structure à travers un ensemble d'étapes prédéfinies les actions à mener. Elle guide pas-à-pas les analystes tout au long de cycle de vie du système, en référence aux modèles disponibles. Il faut donc maintenir, en parallèle avec la gestion du cycle de vie du système la documentation-modèle correspondante. En d'autres termes, une gestion basée-modèle du cycle de vie du système doit s'accompagner d'une gestion du cycle de vie du modèle et des vues adéquates. La démarche générale proposée est la suivante (Figure 4.1) :

- Chaque étape de construction du modèle (vue fonctionnelle, organique, opérationnelle) est mise en rapport avec un niveau de spécification du système. C'est le processus d'élaboration d'une bibliothèque de modèles (Chapitre 3, § 3.3.2.) documentant le système.
- La gestion du cycle de vie du système est rythmée par la détection d'événements qui conduisent les différents niveaux de pilotage (opérationnel, structurel, stratégique) à mettre en œuvre des mesures correctrices. La détection de ces événements est la raison d'être des Indicateurs de Performances implémentés sur le système réel, abordés dans ce chapitre.
- Selon l'amplitude de la refonte (c'est-à-dire la remise en question de caractéristiques opérationnelles, organiques ou fonctionnelles du système) requise, on utilisera le modèle de niveau ad hoc pour pré-évaluer les performances des solutions alternatives. Ici encore, il est fait référence aux Indicateurs de Performances attachés non pas au système mais aux modèles, également abordés dans ce chapitre.
- Après implémentation d'une solution, il conviendra de recalibrer les différentes vues modèles sur le système réalisé pour maintenir la documentation à jour.

³⁷ Pour une revue sur ce thème, voir [Quibel, 1996].

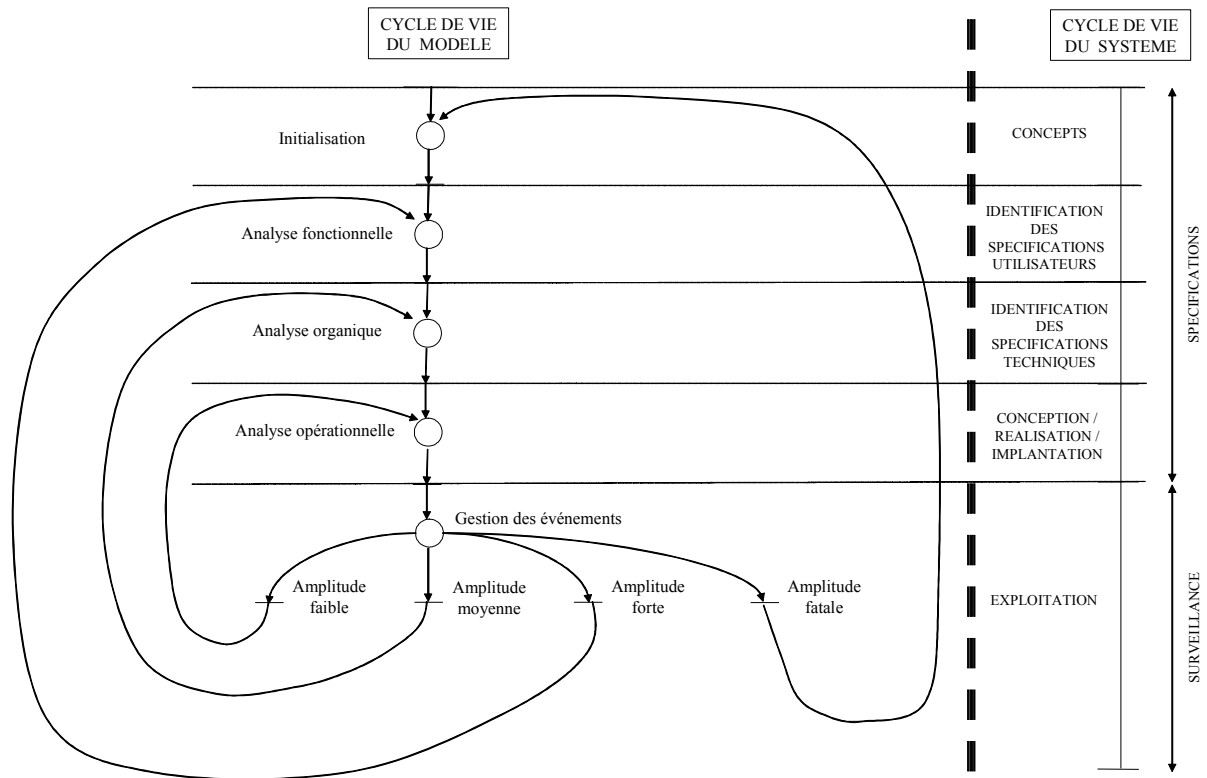


Figure 4.1 – Synchronisation des cycles de vie système et modèle

2.2. Démarche méthodologique pour la gestion basée-modèle du cycle de vie du système

Nos propositions visent à relier les concepts manipulés en Modélisation d'Entreprise (vues-modèle, Indicateurs de Performance,) et le pilotage de l'évolution du système dans ses différents horizons de pilotage opérationnel, structurel, stratégique. Nous nous plaçons plus particulièrement dans la continuité de la démarche GEM, mais notre représentation est compatible avec d'autres démarches de gestion de l'évolution (Roue de Deming, [Deming, 1982], méthode PETRA [Berrah et al, 2001]). Notre démarche de gestion basée-modèle du système de production est structurée comme suit (Figure 4.2) :

La première étape (étape 1) est une étape de veille réalisée par les différents niveaux de pilotage sur le système existant et sur son environnement. Au niveau stratégique, les événements sont à la fois exogènes (surveillance du marché) et endogènes (surveillance de la performance du système). Au niveau structurel, la veille est principalement interne (performance de l'organisation) bien que certains facteurs exogènes (modification de l'offre technologique, recrutement de personnels) doivent être considérés. Au niveau opérationnel, les événements à traiter sont principalement les aléas qui écartent le fonctionnement du système des régimes nominaux pour lesquels l'organisation a été originellement conçue. Ces aléas sont des défaillances d'origine interne (pannes, indisponibilité du personnel) et externe (défaillance des fournisseurs ou des sous-traitants, irruption - annulation de commandes...). La veille interne est, à chaque niveau, basée sur l'analyse des indicateurs de performance relatifs au système lui-même.

Lorsque qu'un événement susceptible de modifier le système est détecté par un niveau de pilotage, c'est-à-dire quand une baisse significative de la performance du système est observée, une procédure de gestion des événements est déclenchée. L'expression « gérer les événements » signifie les analyser, juger de leur impact et décider d'actions correctrices, et ce de manière réactive ou proactive. La procédure de gestion des événements est basée sur l'analyse de la criticité de l'événement (étude AMDEC). Si besoin est, un projet de ré-ingénierie est alors déclenché (étape 2).

L'étape de modélisation du système existant (AS IS) (étape 3) considère le système selon les différents points de vue développés dans la première partie de la thèse :

- L'étape d'initialisation (3-0) permet de reconstituer la fonction économique du système réel vis-à-vis de son marché en identifiant les Indicateurs de Performance de ce niveau dont dispose l'entreprise ;
- L'étape de modélisation fonctionnelle (3-1) permet reconstituer les fonctions internes, ou fonctions techniques, du système réel avant de considérer l'organisation qui les réalise.
- L'étape de modélisation organique (3-2) procure une description précise de l'organisation physique du système des ressources mises en œuvre pour accomplir les fonctions précédemment identifiées ;
- L'étape de modélisation opérationnelle (3-3) permet de saisir les modalités d'exploitation du système de production (Gestion de Production)

L'étape 4 s'attache à analyser les causes des dysfonctionnements du système au travers des différents modèles établis.

L'étape 5 accompagne le projet de ré-ingénierie - basée modèle. L'analyste explore différents scénarios d'amélioration future du système sur la base des modèles. Il s'agit d'une pré-évaluation, par les modèles de niveau ad hoc, de réalisations alternatives. Les Indicateurs de Performances utilisés sont donc valués par les modèles et permettent de sélectionner une solution satisfaisante. Il peut s'agir d'une reconfiguration du modèle opérationnel si les changements opérés n'ont pas d'impact sur la structure du système (cas 1, Figure 4.2) ; d'une reconfiguration du modèle organique si les changements effectués modifient la définition organique du système, sans toutefois modifier les fonctions qu'il réalise (cas 2, Figure 4.2) ; d'une reconfiguration du modèle fonctionnel si les changements réalisés remettent en question la stratégie du système (cas 3, Figure 4.2) ; d'une complète refonte du système en dernier recours (cas 4, Figure 4.2). Bien évidemment, retoucher la définition fonctionnelle du système amène par la suite à reconfigurer son organisation, puis sa mise en scène opérationnelle. A contrario, une intervention au niveau organique ou opérationnel peut être justifiée par l'amélioration de performances de ce niveau, sans nécessairement remettre en cause les performances du niveau fonctionnel.

L'étape 6 consiste marque le début de la phase d'implémentation de la solution retenue au terme de l'étape précédente (Modèle TO BE). Il s'agit de définir la maîtrise d'œuvre, les modalités de financement, le planning et le suivi de la réalisation.

L'étape 7, dernière étape, est la mise en exploitation du système dans sa configuration nouvelle. Le modèle TO BE est transformé en nouveau système AS IS. Les nouveaux indicateurs de performances du système doivent être mis en place en vue :

- d'une part, de ré-aligner le modèle sur le système réel. La gestion de la documentation est donc un élément important de la démarche et justifie la classification des modèles introduite au chapitre 3, § 3.3.2.

- d'autre part, de permettre un nouveau cycle d'exploitation et l'enclenchement de l'activité de veille aux différents niveaux stratégique, structurel et opérationnel (retour à l'étape 1).

Ce cycle se répète donc autant de fois que nécessaire. Toutefois, quand les modèles de l'entreprise pré-existent, l'étape 3 « s'efface » au profit de l'étape 3 bis, qui consiste à analyser directement les dégradations des performances du système en référence aux modèles.

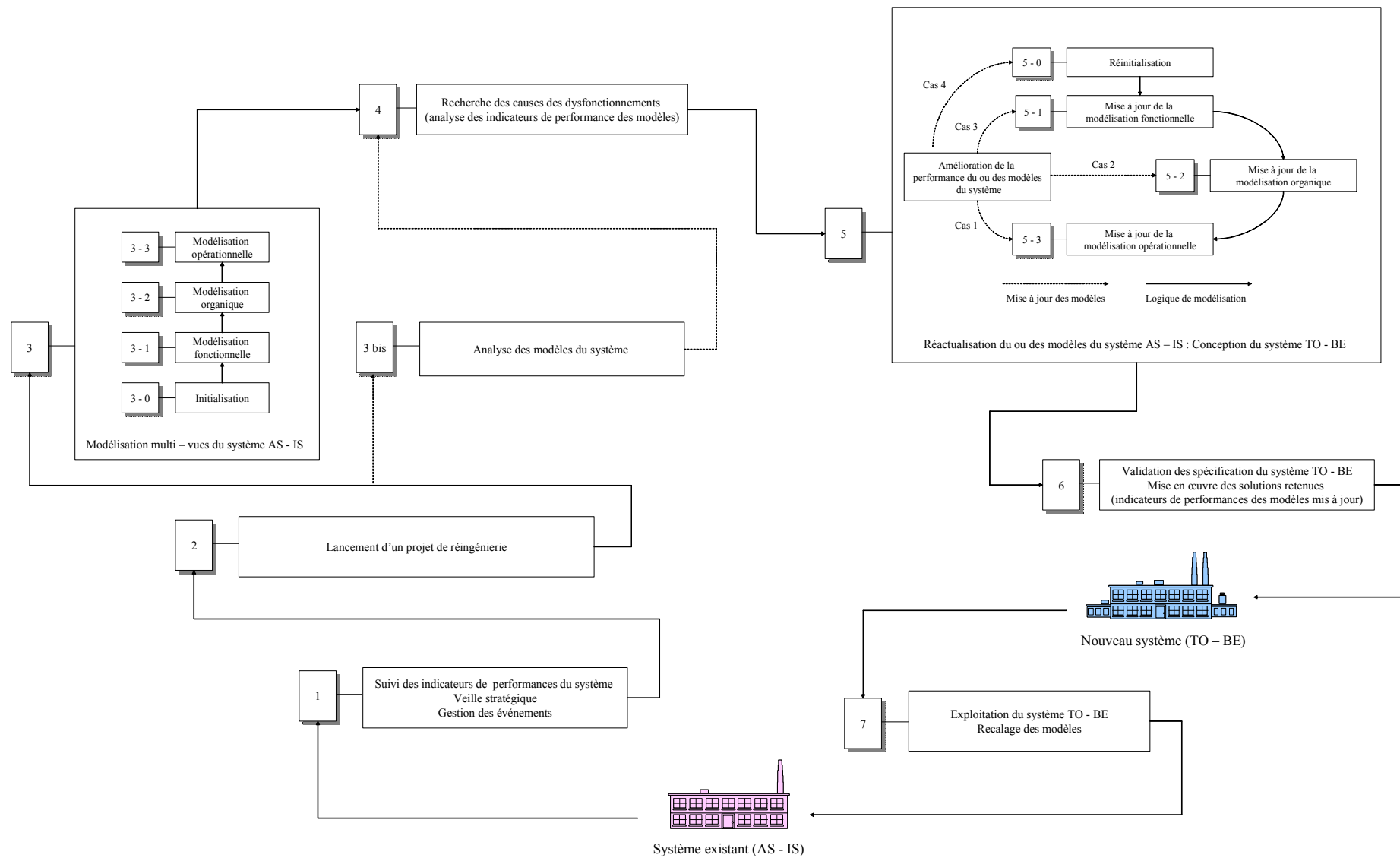


Figure 4.2 – Gestion basée-modèle du cycle de vie des systèmes de production

2.3. Conclusion

Le chaînage des modèles (fonctionnel, organique et opérationnel) obtenus vont permettre de cadrer la ré-ingénierie d'un système de production donné, d'une part en structurant les spécifications en correspondance avec différents niveaux d'objectifs, d'autre part en déterminant les indicateurs de performance qui permettront de comparer le futur système aux modèles de référence.

C'est l'objet du paragraphe qui suit que de revenir sur la notion de performance et d'indicateurs de performances, et d'analyser leur rôle dans le processus de ré-ingénierie basée - modèle des systèmes de production.

3. EXPRESSION DE LA PERFORMANCE

3.1. Notion d'indicateur de performance

3.1.1. Définitions

La notion d'indicateur de performance, apparue dans la littérature à partir des années 80, répond au besoin d'exprimer un degré de satisfaction, par les concepteurs et / ou les exploitants d'un système, quant au comportement de celui-ci.

Un indicateur de performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou système (réel ou simulé) par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise [Fortuin, 1988] [AFGI, 1992]. Tout indicateur de performance est vu comme un triplet [Bitton, 1990] associant trois paramètres : un objectif, une mesure et une variable essentielle ou variable d'état traduisant la performance (quantité, coût, délai) [Berrah, 2002]. Cette variable d'expression de la performance est donc homogène à l'écart entre un objectif et une mesure. Nous considérerons que la performance peut être évaluée a posteriori ou a priori, selon que la mesure provienne du système réel, ou bien qu'elle traduise le comportement d'un modèle du système (auquel cas le terme mesure perd sa connotation proprement expérimentale). Nous distinguerons donc les notions d'indicateurs de performance – système (IP système) et d'indicateurs de performance – modèle (IP modèle) qui nous paraissent de nature à clarifier l'origine et la qualité de l'expression de la performance, dans les différentes étapes du processus d'ingénierie ou de ré-ingénierie.

3.1.2. Classification

On trouve dans la littérature une variété d'indicateurs de performance relatifs aux processus ou aux systèmes de production, selon leur logique d'utilisation, leurs composantes (objectif, mesure, variable essentielle), leur nature (durée de vie, domaine d'évaluation), et leur type (performance, contre – performance). Nous reproduisons par le tableau 4.1 la typologie dressée par [Berrah et al, 2001].

Logique	Indicateurs de performance	Description	Exemple
Selon la logique d'amélioration	Indicateurs de progrès et indicateurs de maîtrise	Les indicateurs de progrès sont liés aux objectifs prioritaires. Leur durée de vie dépend de la maîtrise de ces objectifs. Ils sont qualifiés de conjoncturels. Les indicateurs de maîtrise évaluent les tendances d'évolution ou écarts ; Stables et permanents, ils sont qualifiés de structurels. Un indicateur conjoncturel peut devenir structurel ou être abandonné.	Taux d'accident (nombre de remises en cause d'un produit nouveau). Niveau des stocks (productivité, satisfaction des clients).
	Indicateurs de mobilisation	Les indicateurs de mobilisation sont liés à la dynamique du système.	Degré de polyvalence du personnel.
	Indicateurs de référence	Les indicateurs de référence représentent ce que le système est capable de faire de meilleur, reproductibilité non obligatoire.	Meilleur temps de changement de série.
Selon le degré de réactivité	Indicateurs de résultat et de processus	Les indicateurs de résultat sont associés aux variables d'état. Une variable d'état est une grandeur à observer pour connaître le degré de réalisation d'un objectif (rétrospection).	Conformité du produit.
		Les indicateurs de processus sont associés aux variables d'action. Une variable d'action est une variable sur laquelle on peut agir pour faire évoluer le processus afin de mieux atteindre l'objectif (prospection). On parle aussi d'inducteur, de facteur, de paramètre.	Conformité d'assemblage (technologie employée) et conformité d'usinage (conditions de coupe).

Tableau 4.1 – Typologies d'indicateurs de performances (source <http://www.esia.univ-savoie.fr/labos/>)

Logique	Indicateurs de performance	Description	Exemple
Selon le niveau hiérarchique	Indicateurs stratégique, tactique et opérationnel	<p>Ces indicateurs sont liés respectivement aux horizons stratégiques, tactiques et opérationnels.</p> <p>Un indicateur de processus d'un niveau décisionnel donné devient indicateur de résultat pour le niveau décisionnel lui étant immédiatement inférieur, et ainsi de suite [Lorino, 1991].</p>	Qualité globale, taux de rebut par unité et flot.
Selon le positionnement du pouvoir d'action	Indicateurs de pilotage	Les indicateurs de pilotage servent au pilotage. A usage essentiellement local, ils peuvent être liés à des variables internes au système, auquel cas une action sur ces variables est contrôlée. Ils peuvent être liés à des variables externes, mais sur lesquelles un suivi veut être maintenu (ce sont alors des indicateurs dits latéraux ou de suivi).	Pour la production, un indicateur de pilotage interne est le taux de retouche ; un indicateur de suivi est le taux de rebuts fournitures.
	Indicateurs de « reporting »	Les indicateurs de « reporting » servent à rendre compte. Le pouvoir d'action se situe des niveaux supérieurs.	Taux d'absentéisme.
Selon les variables d'action	Indicateurs simple et complexe	Un indicateur simple n'est associé qu'à une seule variable d'action.	Fiabilité intrinsèque d'un équipement.
		Un indicateur complexe est associé à des variables d'action multiples.	Disponibilité d'une ligne de production.

Tableau 4.1 – Typologies d'indicateurs de performances - suite et fin (source <http://www.esia.univ-savoie.fr/labos/>)

3.2. Systèmes d'indicateurs de performance

De nombreux travaux traitent des problématiques liées à la conception, à l'exploitation, et à l'évolution des « systèmes d'indicateurs de performance », eux-mêmes visant à définir une méthodologie de définition, de mise en place et d'utilisation d'indicateurs de performance³⁸. Nous citerons les méthodologies ABC / ABM [Berrah, 1997], le « Balanced ScoreCard » (BSC) [Kaplan et Norton, 1998], le « Quantitative Model for Performance Measurement System » (QMPMS) [Bititci, 2001], le « Process Based Approach » (PBA) [Bourne et al, 2000], le « Integrated Dynamic Performance Measurement System » (IDPMS) [Ghalayini et al, 1997], le « Process Performance Measurement System » (PPMS) [Kueng et al, 2001], l'approche ENAPS [Browne et al, 1999], la mise en place d'indicateurs de performance dans le modèle SCOR³⁹, ainsi que la méthodologie ECOGRAI issus de notre propre laboratoire [Ducq et Gentil, 2003].

Toutefois, notre étude ne porte pas sur les systèmes d'indicateurs de performance eux – mêmes, dont la problématique est, au travers d'ECOGRAI, connue de notre laboratoire. Nous nous concentrerons, dans ce chapitre, sur l'usage qui doit être fait d'un « système d'indicateurs de performance » dans une démarche d'ingénierie basée modélisation, et ce dans les différentes étapes du projet d'ingénierie. Ainsi, nous remarquons que tous ces systèmes d'indicateurs de performance ont recours à un modèle de l'entreprise et de son système de production afin d'identifier ses Facteurs Clés de Succès⁴⁰, et proposer un plan d'amélioration de l'entreprise. Wisner et Fawcett, en particulier, insistent sur le déploiement de la stratégie du système d'indicateurs sur les parties critiques de l'entreprise, qualifiées de « zones fonctionnelles », et incorporent le « rafraîchissement » périodique de cette évaluation. Le cadre de mise en place formalisé proposé comporte neuf étapes [Wisner and Fawcett, 1991] :

- Définir clairement la mission de l'entreprise ;
- Identifier les objectifs stratégiques déduits de cette mission ;
- Analyser la contribution des différentes « zones fonctionnelles » à l'atteinte des objectifs stratégiques ;
 - Mettre en place des indicateurs globaux sur ces « zones fonctionnelles » destinés au reporting vers la direction ;
 - Déployer les objectifs stratégiques et des indicateurs globaux à tous les niveaux ;
 - Vérifier la cohérence des indicateurs mis en place à tous les niveaux ;
 - Vérifier la compatibilité des indicateurs utilisés sur les différentes « zones fonctionnelles » ;
 - Utiliser les indicateurs de performance pour piloter l'entreprise ;
 - Réévaluer périodiquement la pertinence des indicateurs selon l'environnement concurrentiel.

L'identification d'un système d'indicateurs de performance part donc des facteurs de succès

³⁸ Pour une revue sur l'ensemble de ces travaux, voir [Clivillé, 2004].

³⁹ <http://supply-chain.org/slides/SCOR5.0OverviewBooklet.pdf>

⁴⁰ Les Facteurs Clés de Succès (FCS) ont un impact déterminant sur les positions de compétitivité dans un secteur donné, puisqu'ils représentent les enjeux de succès auprès des clients. Il s'agit donc de critères de performance externes au système. Ces éléments sont à rechercher dans l'environnement au niveau des types de clients [Garibaldi, 2001].

de l'entreprise dans son marché, pour se concentrer se concentrer sur le système lui-même, appréhendé aux différents niveaux de détails. La mise en œuvre d'un système d'indicateurs de performance consiste en la conception, en l'exploitation et en la révision d'un système d'indicateurs. Le cycle de vie du système d'indicateurs de performance tel que défini dépend en toute logique du cycle de vie du système que l'on cherche à améliorer. Partant de cette analyse de la littérature, il nous est facile d'inscrire l'usage des indicateurs de performance dans les trois niveaux de pilotage de l'entreprise définis au §2.1.1 de ce chapitre.

3.3. De l'usage des modèles et des indicateurs de performance pour la gestion du cycle de vie des systèmes de production

Nous distinguerons plusieurs classes d'indicateurs, selon le niveau de pilotage auquel ils s'adressent :

- Les indicateurs pour le pilotage stratégique de l'entreprise. C'est sur la base de ces indicateurs que s'effectue la veille stratégique et que se justifie le lancement de projets de ré-ingénierie.
- Les indicateurs de performance structurels support à la ré-ingénierie proprement dite, qui permettent la pré-évaluation des différents scénarios d'amélioration.
- Les indicateurs pour l'exploitation du système, qui permettent d'en détecter les dysfonctionnements eu égard aux fonctionnements nominaux prévus lors de la conception du système.

Chaque niveau s'appuie sur différentes vues du système (vue fonctionnelle, organique ou opérationnelle), et utilise donc des indicateurs de performance système et modèle plus ou moins agrégés afin de valider les spécifications des états futurs du système (Figure 4.3). Le niveau de veille stratégique ou gestion économique s'appuie essentiellement sur un modèle fonctionnel de l'entreprise et sur des indicateurs « système » et « modèle » relatifs à la place de l'entreprise au sein de marché. Le niveau de ré-ingénierie utilise les modèles organique et opérationnel, ainsi que les indicateurs « modèle » et « système » associés à ces vues, pour procéder aux modifications internes du système. Enfin, le niveau d'exploitation se base sur le modèle opérationnel et les indicateurs « modèle » et « système » correspondants, en considérant uniquement les processus opérants du système.

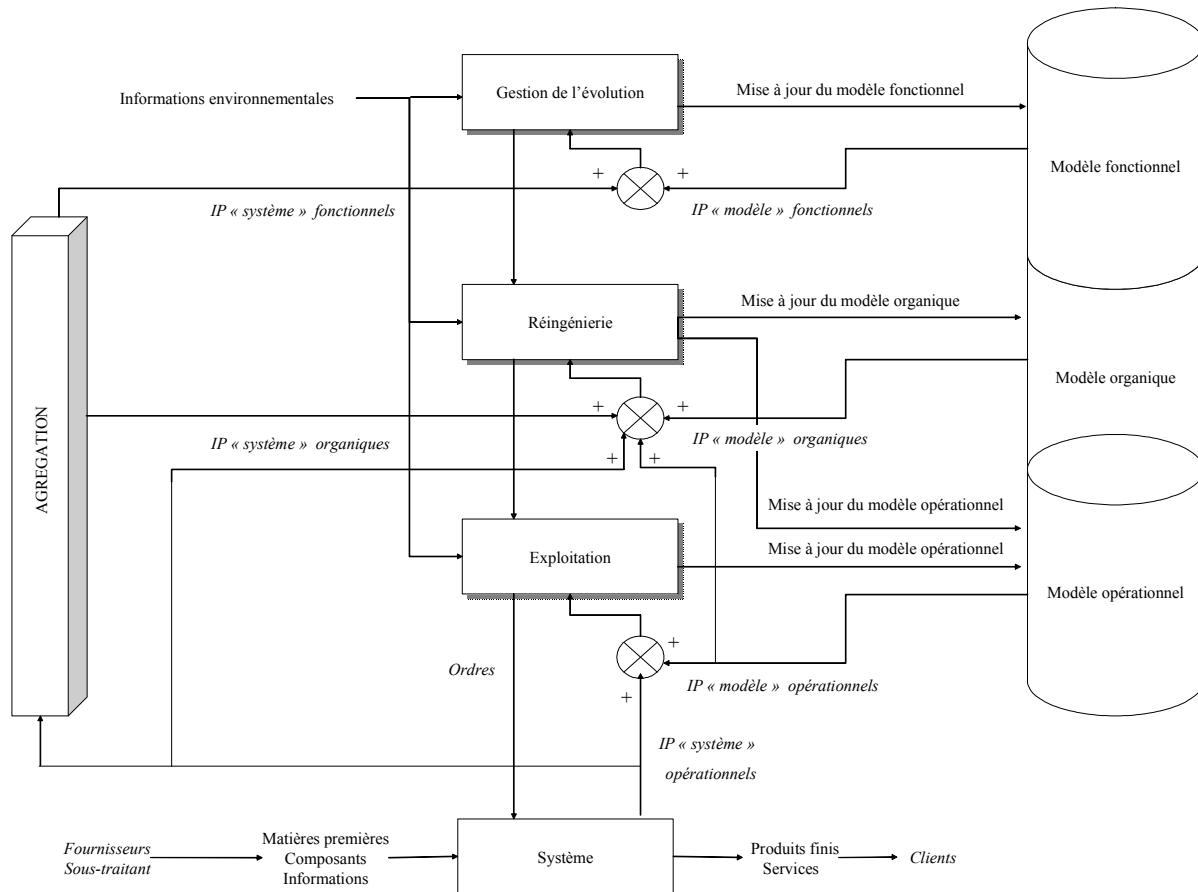


Figure 4.3 – Niveaux de pilotage et modèles associés pour la gestion du cycle de vie du système

3.3.1. Modèles et indicateurs de performance pour la gestion stratégique

La « surveillance » d'un système de production et la mise en place d'indicateurs de performances dédiés à cette surveillance permettent de s'assurer que le système maintient sa fonction économique dans son environnement et de déclencher un projet de ré-ingénierie si besoin est. La performance est donc relative au marché. Il faut être attentif, d'une part, aux variations internes du système et, d'autre part, aux modifications environnementales de ce système. Sur ce dernier point, nous avons déjà analysé l'intérêt de fonctions techniques de veille, qui « scrutent » l'environnement en vue d'éventuelles variations. Toute fonction technique de veille est associée à un ou plusieurs indicateurs latéraux (augmentation de la demande, étude de la concurrence, etc.).

Dans un premier temps, il s'agit ici de mettre en œuvre des indicateurs de progrès, liés aux objectifs prioritaires d'évolution. Ils consistent, notamment, en l'expression des Facteurs Clés de Performance (FCP) qui traduisent les Facteurs Clés de Succès (définis précédemment) au niveau des fonctions de l'entreprise, en représentant des enjeux de performance interne, non perçus par le client. Par ailleurs, il faut instaurer, en parallèle, de nouveaux indicateurs de pilotage stratégiques (politique d'innovation, délai d'introduction de produits nouveaux, choix des fournisseurs, etc.) ainsi que des indicateurs latéraux permettant de maintenir un suivi sur l'environnement du système. Pour ce faire, le niveau de pilotage stratégique s'appuie sur un modèle fonctionnel de l'entreprise, qui permet d'identifier toutes les contraintes externes auxquelles est soumis le système afin de déterminer ses degrés de liberté lors de prises de décision à horizons lointains. Il met donc en œuvre des IP-Modèle de niveau stratégique qui

objectivent la pérennité de l'entreprise, ses orientations et son positionnement dans son environnement (taux de rentabilité⁴¹, potentiel de produits nouveaux, taux d'aboutissement des projets Recherche et développement, etc.). Plus précisément, il est ici question d'indicateurs de « reporting » consistant à analyser le marché (taille, caractère porteur, attentes, perspectives) afin de reconnaître les menaces (concurrence) et les opportunités de celui-ci.

3.3.2. Modèles et indicateurs de performance pour la ré-ingénierie

La ré-ingénierie consiste à transformer tout ou partie du système, sur la base des indicateurs de progrès mis en place par le niveau de pilotage stratégique, en raisonnant sur les modèles organique et opérationnel du système.

Le modèle organique permet de mesurer l'efficacité de l'organisation mise en œuvre pour réaliser les fonctionnalités du nouveau système définies précédemment. Les IP-Modèle du pilotage structurel quantifient la productivité de l'organisation (notamment, nombre d'employés et investissements immobilisés (équipements, surfaces) rapportés aux volumes et à la variété de la production, et indicateurs de maîtrise des processus de fabrication (taux de rebut, niveaux de qualités). Le modèle opérationnel permet de caractériser la performance d'exploitation du système de production. Le modèle opérationnel doit donc proposer des IP-Modèle de résultats liés à la gestion de production que ménage l'organisation structurelle du système. Ces indicateurs sont relatifs aux niveaux et aux ruptures de stocks, aux retards de production, au taux d'occupation des ressources.

Des indicateurs de pilotage d'ordre opérationnels (associés aux fonctions de transformation du système) sont instaurés grâce à des indicateurs de processus liés à des variables d'action telles que la main d'œuvre, les méthodes, les machines ou la matière. Il s'agira de vérifier que les résultats obtenus sont suffisants, compte tenu des investissements portés lors des phases précédentes. En cas de non satisfaction, il faudra réorganiser les ressources matérielles et / ou humaines impliquées jusqu'alors.

A l'issue de la réactualisation des modèles, une simulation est effectuée afin d'établir des indicateurs « modèle » de référence, correspondant aux performances maximales qu'il est possible d'obtenir avec les mises à jour effectuées. Ensuite, il s'agit de calculer les investissements nécessaires pour l'amélioration, les bénéfices pour l'entreprise et les avantages et inconvénients de chaque proposition, si plusieurs propositions il y a. La solution retenue et implantée, des indicateurs de résultats « système » sont mis en place, qui évaluent les tendances d'évolution ou écarts obtenus avec les indicateurs de référence calculés précédemment. Les analystes sont alors en mesure de juger l'efficacité du système, qui consiste en l'articulation entre les résultats définis initialement et les objectifs obtenus : « Est-on arrivé à ce que l'on avait l'intention de faire, et à quel point l'objectif fixé est-il atteint ? ». Si l'efficacité du système, jugée grâce à des indicateurs de résultat issus de la comparaison entre les indicateurs « modèle » de référence et les indicateurs « système », n'est pas satisfaisante, les actions envisageables portent sur l'organisation interne du système et sur les différents paramètres de réglages accessibles (Figure 4.4).

⁴¹ Le taux de rentabilité d'une entreprise rapporte les marges au capital investi.

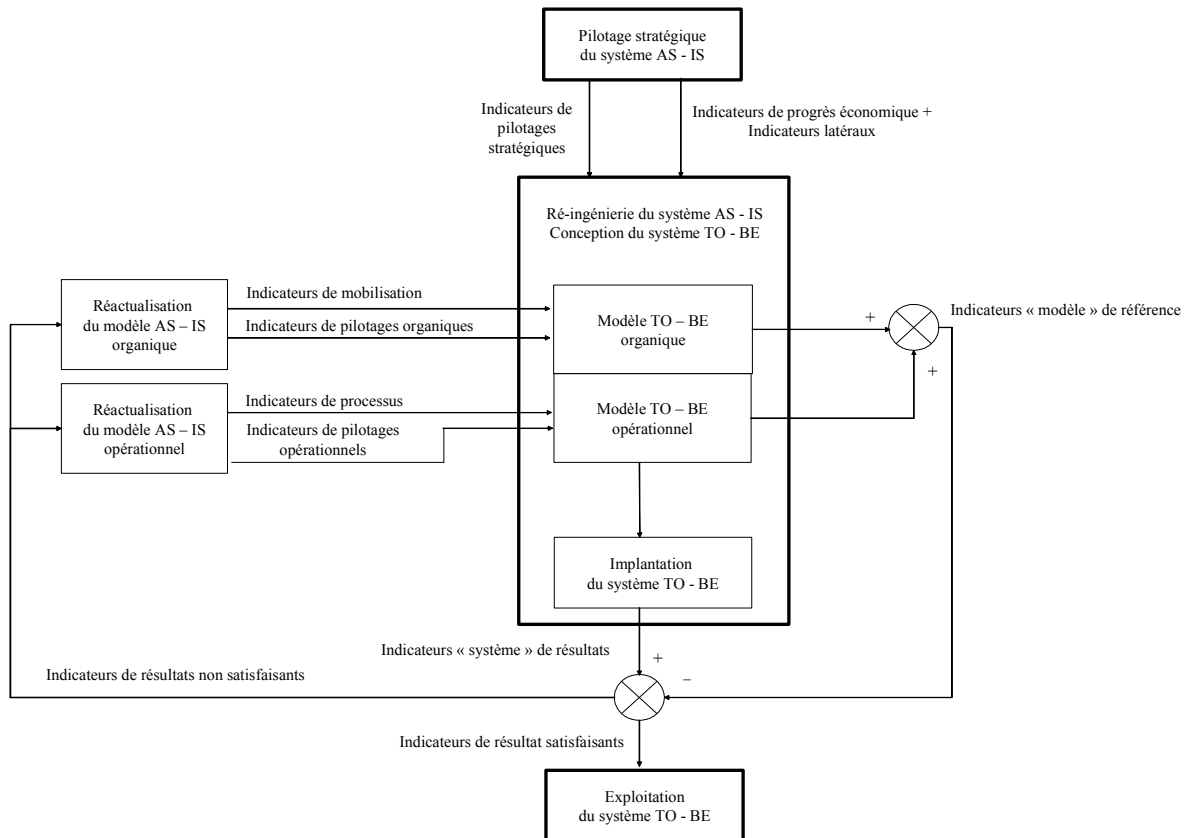


Figure 4.4 –Niveaux de gestion du projet de ré-ingénierie

3.3.3. Modèles et indicateurs de performance pour l'exploitation

Des changements concernant des modifications opérationnelles internes à l'entreprise sont courants, et font partie intégrante du quotidien. Des IP-Système peuvent être implantés qui produisent des mesures sur des variables d'état du système physique [Gallois, 1990] en vue de détecter des dysfonctionnements. Nous reprendrons ici les préconisations de Mather, qui suggère six indicateurs (que nous qualifierons d'IP-système de suivi) qui permettent d'évaluer l'excellence en production [Mather 1988] :

- Le rapport P / D : ce rapport le *lead time* P total d'un produit (depuis l'approvisionnement de la matière première jusqu'à l'expédition du produit fini) au *lead time* D client (délai indiqué au client lorsque celui-ci demande un produit *ou* délai exigé par le client *ou* encore délai qu'il faut tenir pour rester compétitif sur le marché)⁴².
- Le temps de changement de série : celui-ci doit être le plus petit possible.

⁴² P se calcule facilement par l'addition du *lead time* d'approvisionnement de la matière première (ou des composants) nécessaire à la réalisation d'un produit avec les *lead time* de production et d'expédition du produit. Le calcul de P peut être fait pour un article ou un type d'article.

D peut être évalué de différentes façons, en fonction de la stratégie de l'entreprise. D peut ainsi correspondre au délai indiqué au client lorsque celui-ci demande un produit (1), au délai exigé par le client (2), ou encore au délai qu'il faut tenir pour rester compétitif sur le marché (3).

L'auteur recommande de choisir l'option (2). Lorsque le rapport P / D atteint 1, il propose de changer la définition de D et de prendre l'option (3). L'option (1), peu utilisée, possède l'inconvénient de ne pas indiquer si D est bon ou mauvais.

- Le respect du programme : il s'agit de vérifier, a posteriori, que les dates de réalisation des articles concordent avec celles initialement prévues.
- La distance parcourue : les trajets d'approvisionnement, de production et de distribution des articles doivent être réduits au minimum.
- Le changement des « ordres » ou « commandes » doit être limité.

L'auteur remarque en effet qu'il existe principalement trois types de commandes exécutées quotidiennement dans les entreprises : la détermination des besoins clients, les ordres d'achats transmis aux fournisseurs, et les ordres de fabrication passés dans les ateliers afin d'autoriser la production. Chacune de ces commandes est définie par une référence, une quantité et une date. Mather de réduire au maximum les changements intervenant quant à ces ordres, afin de respecter une certaine stabilité du processus de planification de l'entreprise.

- La qualité des données : simplification des flux de données, abandon de la collecte de données inutiles, etc.

Pour effectuer un suivi cohérent de la performance du système, il convient donc d'observer si ces six indicateurs de suivi conservent un certain niveau de performance, pour un environnement du système stable. En cas d'apparition d'un événement, c'est-à-dire lorsqu'un IP (de suivi, latéral, etc.) atteint un seuil critique, une procédure de gestion des événements est déclenchée.

4. ANALYSE DE CRITICITE ET GESTION DES EVENEMENTS

4.1. Introduction

La mise en place d'IP-Système répond à la nécessité d'une *surveillance* de la performance du système, en vue d'en détecter les dysfonctionnements eu égard au comportement nominal qui avait été prescrit par ses concepteurs. Ceci vaut pour les différents niveaux de pilotage (exploitation, ré-ingénierie, gestion stratégique) qui, chacun, dispose des indicateurs *ad hoc* qui permettront (Figure 4.5) :

- La valuation et le monitoring (constitution de tableaux de bord) des indicateurs de performance ;
- La détection et l'analyse de criticité des événements que constituent les apparitions de valeurs ou de tendances anormales de la performance ;
- Le cas échéant, le déclenchement de procédures correctives de ré-ingénierie impactant plus ou moins profondément la structure du système.

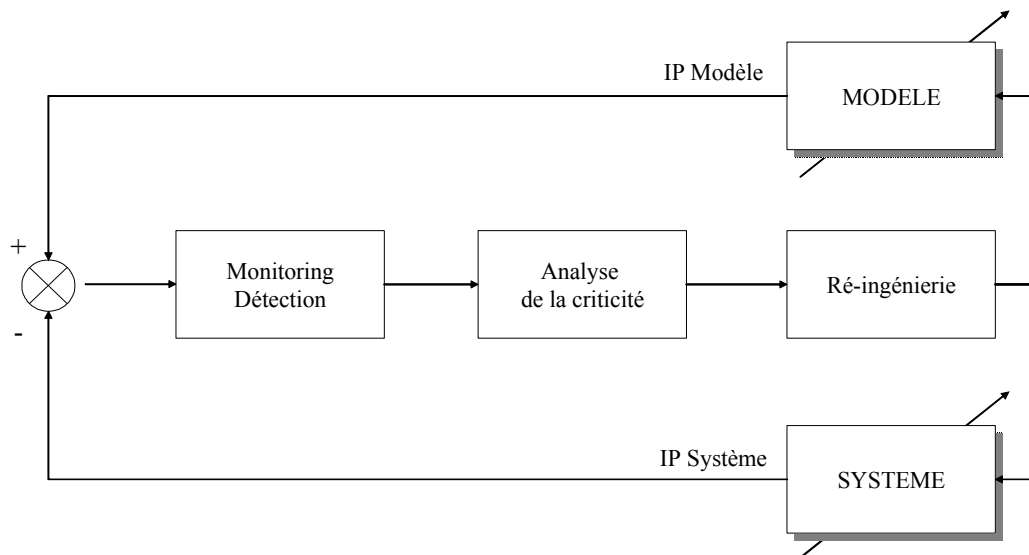


Figure 4.5 – Surveillance de la performance et gestion des événements

Remarque :

*Il y a donc un lien immédiat entre l'analyse des dysfonctionnements du système et les IP-
Système qui permettront à chaque niveau de pilotage d'effectuer l'activité de veille, d'analyse
et de correction éventuelle du système.*

Une procédure de gestion des événements est déclenchée à chaque fois qu'un événement susceptible de justifier une modification du système apparaît, c'est-à-dire à chaque fois qu'un indicateur de performance (de suivi, latéral, etc.) atteint un seuil critique.

L'analyse de criticité des dysfonctionnements est une problématique pour laquelle il existe des aides méthodologiques, dont la plus utilisée est l'analyse AMDEC [Faucher, 2004].

Lorsque l'analyse de la criticité conduite à une décision de correction, les modifications envisagées s'apprécient selon une échelle d'amplitude de l'évolution du système que nous avons caractérisée au chapitre 2 (voir aussi Figure 4.1) :

- faible si le changement effectué impacte faiblement la structure du système ;
- moyenne si le changement effectué modifie la définition organique du système, sans toutefois modifier les fonctions qu'il réalise ;
- forte si le changement effectué nécessite des ajustements fonctionnels ;
- fatale si le changement effectué rend la fonction économique du système obsolète et mène à un démantèlement ou à une reconception complète de celui-ci.

La gestion des événements, basée sur l'analyse de la criticité des anomalies de performance, incite les analystes proposer des actions d'amélioration pré évaluées au moyen de modèles (fonctionnel, organique, opérationnel). Nous allons ici considérer les principaux événements internes ou externes à l'entreprise susceptibles d'impacter celle-ci au niveau opérationnel (§ 4.2), organique (§ 4.3) ou fonctionnel (§ 4.4). Nous élaborerons ensuite les grilles d'analyses AMDEC correspondantes afin de mettre en évidence les différentes variables d'actions correctives qui leur seront associées.

4.2. Evénements de faible amplitude

Un événement est qualifié de faible amplitude s’il ne remet pas en cause la structure du système, mais seulement ses modes d’exploitation. La majeure partie des événements ou perturbations pouvant entraîner des modifications purement opérationnelles de l’entreprise proviennent généralement du secteur production (dysfonctionnement ou fonctionnement dégradé d’équipements). Les opérateurs sur leurs postes de travail étant souvent les premiers touchés, sont souvent les détecteurs de l’anomalie qu’ils signalent au service des méthodes. Celui-ci collecte, centralise et analyse toutes les informations concernant les dysfonctionnements identifiés, puis soumet des propositions d’amélioration du système. Les propositions retenues sont mises en oeuvre par des techniciens du service maintenance.

Les critères permettant d’analyser et de prioriser le traitement des événements de faible amplitude sont principalement :

- Etat des stocks : ce critère permet d’évaluer les stocks de matières premières et autres fournitures, des en-cours et des produits finis ;
- Pertes de matière : matières premières ou fournitures rebutées lors de la fabrication du produit ;
- Retards sur les délais de fabrication initialement prévus ;
- Perte, casse, détérioration de matériel : ce critère est le plus important, et nécessite la mise en état rapide du matériel afin de retrouver un fonctionnement nominal de l’équipement défaillant ;

Par ailleurs, les critères relatifs aux conditions de travail doivent être considérées (sécurité, hygiène, ergonomie des postes de travail).

Conformément à l’approche AMDEC, la criticité d’un événement est évaluée par un Indice de priorité I, fonction de sa fréquence d’occurrence (O), de son degré de gravité (G) et du risque de sa non détection (D).

$$I = D \cdot G \cdot O$$

L’indice de priorité (I) permettra aux analystes de prioriser les actions correctives (Figure 4.6). La pondération des critères résulte de l’expertise des dirigeants et / ou analystes et / ou des opérateurs, sur la base de l’expérience (voir Annexe 2, § 4).

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais							Occurrence	Indice de priorité	
Matériel inadapté	Matériel inexistant	usé / détérioré	Propreté - hygiène	Ergonomie	Etat des stocks	Pertes de matière	Perte/casse/détérioration matériel	Retards sur les délais de fabrication	Sécurité	Fréquence d'apparition du dysfonctionnement		

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure 4.6 - Grille AMDEC pour l’analyse de criticité des événements de faible amplitude

4.3. Événements d’amplitude moyenne

Un événement est qualifié d’amplitude moyenne s’il est susceptible de modifier la définition organique du système, sans toutefois remettre en cause les fonctions qu’il réalise. La majeure partie des événements ou perturbations entraînant des modifications organiques de l’entreprise proviennent généralement de problèmes structurels. Les responsables des lignes de production sont les plus à même à repérer tout dysfonctionnement de ce type. Il s’agit alors de prévenir les responsables des unités technologiques - ou ateliers - concernées par le dysfonctionnement. Ceux-ci, en accord avec le responsable de production, analysent les problèmes (Figure 4.7), et revoient éventuellement le choix d’un fournisseur, les affectations du personnel (polyvalence d’un ouvrier, recours à l’intérim), l’utilisation du parc machine, etc.

La cause d’un événement d’amplitude moyenne peut être un fournisseur fréquemment défaillant, la faible disponibilité d’une machine, l’indisponibilité durable d’un employé. Les critères permettant d’analyser et de prioriser le traitement de tels événements sont les suivants :

- **Emploi du temps** : ce critère évalue les absences du personnel engendrées par le dysfonctionnement, et les modifications de planning qui en découlent.
- **Capacité du parc machines** : ce critère jauge les machines rendues inexploitablees par le dysfonctionnement.
- **Productivité physique des différents secteurs et unités technologiques** : ce critère rend compte du rendement technique et humain.

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais			Occurrence	Indice de priorité
Fournisseur défaillant	Faible disponibilité machine	Indisponibilité employé	Emploi du temps	Capacité du parc machines	Productivité (flux physiques)	Fréquence d'apparition du dysfonctionnement	

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure 4.7 - Grille AMDEC pour l’analyse de criticité des événements d’amplitude moyenne

4.4. Événements de forte amplitude

Un événement est qualifié de forte amplitude lorsqu’il est susceptible d’entraîner des ajustements fonctionnels du système. La majeure partie des événements ou perturbations entraînant de tels besoins de modification proviennent de l’environnement du système, et non seulement du système lui-même. Il peut s’agir d’un facteur financier (inflation monétaire, taux de change) technologique (irruption de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés, ...), juridique (lois du travail), normatif (normalisation, certification), socioculturel ou démographique, et dépend en majeure partie des facteurs de marché caractérisant l’environnement commercial de l’entreprise : ses fournisseurs, ses clients, ses sous-traitants, mais aussi ses concurrents (Chapitre 1, § 3.2).

Parmi les personnes les plus à même de détecter les événements de ce type, on retrouve principalement le responsable des achats et des approvisionnements, le responsable des ventes, du marketing. L'analyse de criticité incombe au niveau managérial de l'entreprise et peut impacter la stratégie générale de l'entreprise. En fonction de la gravité de la situation (Figure 4.8), les moyens d'action sont les services R&D pour la refonte plus ou moins profonde du système, et / ou le bureau d'études pour une migration des produits (Chapitre 2, § 3.3.1).

Les critères permettant d'analyser et de prioriser le traitement de tels événements sont les suivants :

- Rang concurrentiel, parts de marché ;
- Productivité technique : coût de revient ;
- Ventes (volume des ventes, chiffre d'affaire, etc.) ;
- Niveau de satisfaction du personnel ;
- Qualité et niveau de satisfaction du client ;
- Productivité financière (placements, cotation en bourse, etc.)

Causes du dysfonctionnement								Impacts sur la démarche qualité et sur les délais					Occurrence	Indice de priorité	
Cause socio-culturelle	Cause géographique	Concurrence accrue	Perte ST / fournisseur	Cause technologique	Perte client / marché	Cause juridique	Cause financière	Rang concurrentiel ; Parts de marché	Productivité technique	Ventes	Niveau de satisfaction du personnel	Qualité et niveau de satisfaction des clients	Productivité financière		Fréquence d'apparition du dysfonctionnement

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure 4.8 - Grille AMDEC pour l'analyse de criticité des événements de forte amplitude

4.5. Conclusion

La détection et l'interprétation des différents événements – favorables ou défavorables – à la pérennisation de la fonction économique de l'entreprise justifie une veille permanente, tant au niveau stratégique qu'au niveau opérationnel (exploitation). L'analyse des IP-Système passe par la détection des écarts entre performance réelle et performance prescrite par les IP-Modèle. Ces écarts, s'ils sont jugés significatifs, constituent des dysfonctionnements du système. Une analyse de criticité appliquée aux événements observés sur le système réel et son environnement est donc nécessaire pour la justification d'actions correctives dont la responsabilité incombe aux trois niveaux de pilotage stratégique, structurel et opérationnel. Chacun de ces trois niveaux base son activité de surveillance et la pré-évaluation des actions correctives sur, respectivement, les modèles fonctionnel, organique et opérationnel du système, qui fournissent les IP-Modèle cible de référence.

5. LE MODELE GRAI SUPPORT A LA CONDUITE DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

5.1. Introduction

Nous nous sommes attachés à présenter les activités de ré-ingénierie et de gestion de l'évolution en tant qu'activités de pilotage, au même titre que les activités d'exploitation. Or, le modèle GRAI est un modèle générique de conduite. Il est donc utilisable pour intégrer les différents niveaux de pilotage et les processus associés dans une représentation unifiée dans laquelle les liens entre niveaux de pilotage sont explicites. C'est l'objet de ce paragraphe de représenter par les formalismes GRAI les niveaux de pilotage stratégique et de pilotage de la ré-ingénierie au-dessus du niveau exploitation (lequel, ayant été présenté au chapitre 1, § 5.1.2.2, ne sera pas repris ici⁴³).

5.2. Système de conduite multi-niveau pour l'évolution des systèmes de production

5.2.1. Définition des niveaux décisionnels

Dans notre étude, nous nous sommes attachés à identifier plusieurs niveaux de pilotage dans le cadre de la gestion du cycle de vie du système : le niveau stratégique, qui encapsule le pilotage de la ré-ingénierie qui, lui-même, ajuste l'organisation laquelle enfin est sujette à l'exploitation . Dans le modèle décisionnel GRAI, les niveaux sont caractérisés par des ordres de grandeurs différents du couple horizon / période. Si la valeur de l'horizon peut être relativement aisément évaluée, la période ne peut quant à elle être considérée comme fixe car les modifications du système sont de nature davantage événementielle que périodique [Malhéné, 2000]. Nous caractériserons plutôt les trois niveaux de pilotage par, outre leur horizon de décision, les critères de profondeur (opérationnelle, organique, fonctionnelle) de la modification, de durabilité de la modification, de difficulté des actions correctives, de réversibilité de la modification, le caractère déterministe de la modification et les acteurs de la modification (Tableau 4.2).

⁴³ La grille GRAI permet la représentation globale de la partie décisionnelle de l'entreprise, ou système de conduite de la production, c'est-à-dire qu'elle permet de conduire l'exploitation du système.

	Niveaux décisionnels		
	pilotage stratégique	Ré-ingénierie	Exploitation
Horizon de temps	Long terme	Long et moyen termes	Court terme
Effet de la décision	Durable	Durable	Brève
Profondeur de la modification de la décision	Modification de la fonction économique du système dans son environnement	Modification organique du système	Modification des modes d'exploitation du système
Actions correctives	Impossibles	Difficiles et coûteuses	Faciles
Réversibilité de la modification	Nulle	Faible	Forte
Acteurs	Direction générale	Analystes / Ingénieurs	Chefs d'ateliers
Déterminisme de la modification	Non programmable	Semi - programmable	Programmable

Tableau 4.2 - Caractérisation de la décision pour la conduite de l'évolution des systèmes de production

5.2.2. Définition des fonctions

Le deuxième axe de décomposition du modèle GRAI fait apparaître les fonctions de pilotage. Au chapitre 2, nous avons caractérisé les différentes fonctions qui permettent de gérer l'évolution des systèmes de production : la fonction économique et les fonctions techniques. Nous rappelons que la fonction économique décrit le rôle de l'entreprise en tant qu'acteur dans son marché, tandis que les fonctions techniques d'une entreprise sont les fonctions permettant d'engendrer la fonction économique du système dans son environnement. Parmi ces fonctions, nous avons distingué les fonctions de veille, les fonctions de conduite et les fonctions de transformation. Les fonctions de veille permettent d'observer l'environnement de l'entreprise et de détecter les évolutions significatives de celui-ci afin de transmettre ces données aux divers centres de décision du système. Les fonctions de conduite, représentant les processus internes du système, concourent à la réalisation de chaque centre de décision. Enfin, les fonctions de transformation mettent en œuvre la réalisation organique du système.

Nous pensons qu'il est possible de généraliser les fonctions de conduite « gérer les produits (GP) », « gérer les ressources (GR) » et « planifier les activités (PL) » en les étendant aux deux niveaux de conduite de l'évolution d'un système de production (Tableau 4.3).

	Gérer les produits	Planifier	Gérer les ressources
Pilotage stratégique	La matière transformée est la définition la plus fonctionnelle du système, c'est-à-dire le rôle du système en tant qu'acteur économique, sur la base des IP-Modèle fonctionnels et des informations extérieures relatives à l'état du marché.	Cette fonction permet de synchroniser les activités relatives à la gestion des 'produits' et des 'ressources' pour le pilotage stratégique du système. Elle est chargée de situer le système au cœur du marché. Il s'agit de conclure quant à l'état du système existant (points fort, faiblesses, facteurs clés de succès, etc.), afin de définir le nouveau rôle du système (réorientation de sa fonction économique), grâce à la comparaison entre les IP-Modèle et les IP-Système fonctionnels.	Cette fonction est associée aux moyens humains et matériels mis en œuvre pour transformer la fonction économique du système (analystes, dirigeants de l'entreprise, expertises extérieures, etc.).
Ré-ingénierie	La matière transformée est l'organisation du système, c'est-à-dire la structure (partie organique) et le fonctionnement (partie opérationnelle) de celui-ci. Il s'agit donc d'un remaniement des méthodes de travail, de la répartition des entités (postes, unités de travail, etc.), des liens entre ces entités, des mécanismes de coordination, etc. Il s'agit en outre, logiquement, d'une modification du fonctionnement du système. Cette transformation s'opère sur la base des IP-Modèle organiques et opérationnels.	Cette fonction permet de synchroniser des activités relatives à la gestion des 'produits' et la gestion des 'ressources' de la ré-ingénierie, grâce à la comparaison entre les IP-Modèle et les IP-Système organiques et opérationnels. Il faut identifier les personnes impliquées dans le projet de ré-ingénierie, en précisant dans quelle(s) étape(s) du projet elles interviendront. Chaque étape devra faire l'objet de livrables ⁴⁴ et d'une validation spécifique, afin de vérifier la conformité du travail effectué avec les objectifs initialement prévus.	Cette fonction est associée aux moyens utilisés pour transformer le système (moyens humains regroupés en groupes de projet chargés de la définition des objectifs du système, et moyens matériels utilisés comme support au développement d'un projet de changement) [Malhéné, 2000].
Exploitation	Cette fonction caractérise l'intendance des produits en gestion de production. Il s'agit donc de gérer le flux de matière transformée par le système physique (commandes, approvisionnements, expéditions, etc.), en raisonnant sur les IP-Modèle opérationnels.	Cette fonction permet de synchroniser les activités de gestion de produits et de ressources pour exécuter le système. C'est donc la programmation des activités de production (calcul des besoins, plan de charge, ordonnancement, lancement), s'effectuant sur la base d'une comparaison entre les IP-Modèle et les IP-Système opérationnels.	Cette fonction caractérise l'intendance des ressources en gestion de production. Il s'agit donc de gérer les ressources utilisées pour transformer le flux de matière (maintenance des capacités des ressources techniques : machines, outillage, etc. ; gestion des ressources humaines).

Tableau 4.3 – Extension des fonctions de conduite de la gestion de la production à la gestion de l'évolution du système de production

⁴⁴ En gestion de projet, les livrables relatent les résultats intermédiaires et finals du projet.

5.2.3. Grille GRAI étendue à la gestion de l'évolution

Le formalisme GRAI initial est conservé. La grille GRAI étendue à la gestion de l'évolution offre une représentation globale de la partie décisionnelle de l'entreprise relative à son évolution, c'est-à-dire du système de conduite de l'évolution de l'entreprise (Figure 4.9). La représentation matricielle illustre une double décomposition fonctionnelle (colonnes) et temporelle (lignes). La décomposition fonctionnelle met en évidence les trois fonctions principales de la gestion de l'évolution d'un système de production : Gérer les 'produits' de l'évolution, Gérer les 'ressources' de l'évolution et Planifier les activités assurant l'évolution du système. La décomposition temporelle distingue les niveaux décisionnels caractérisant les bases de temps de la planification de l'évolution d'un système de production : la pilotage stratégique, la ré-ingénierie, et l'exploitation du système. Enfin, nous faisons apparaître, à l'instar d'une grille GRAI « classiques », les colonnes informations externes et informations internes qui interfacent les centres de décisions avec le système d'information de l'entreprise.

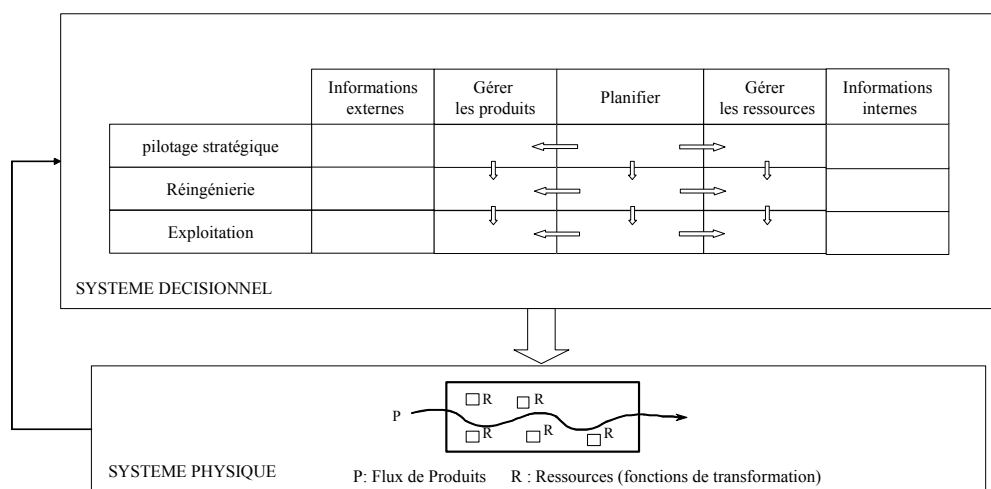


Figure 4.9 – Grille GRAI pour la conduite de l'évolution des systèmes de production

Les décisions propres à cette grille GRAI généralisée sont des décisions de conduite de type planification. A l'intersection d'une fonction et d'un niveau décisionnel se définit donc un centre de décision relatif à l'évolution du système de production. Le cadre de décision permet d'assurer la coordination des centres de gestion de l'évolution. On rappelle que le cadre de décision est défini par un objectif, des variables de décisions qui permettent de déterminer les actions, une ou plusieurs contraintes sur les variables de décision, et un ou plusieurs critères permettant de choisir entre les variables de décision. Ces éléments dépendent des informations disponibles au moment de la prise de décision, et sont transmis par le centre de décision 'piloteur' [Marcotte, 1995] amont au centre de décision considéré.

5.3. Système de conduite pour la ré-ingénierie des systèmes de production

Nous nous concentrons ici sur le niveau de conduite ré-ingénierie, qui, à l'initiative du pilotage stratégique, est chargé de mettre en œuvre les innovations devant conduire au réhaussement ou à la migration du pilotage économique. Les deux variables d'action sont la ré-ingénierie de tout ou partie du système de production et la conception de nouveaux produits. C'est donc tout naturellement que nous nous avons cherché à intégrer la conduite de la conception de produits au même titre que la ré-ingénierie des systèmes de production dans la modélisation de la gestion de l'évolution.

5.3.1. Evolutions couplées du produit et du système

Au chapitre 2, nous avons étudié le parallèle entre les évolutions du produit et du système (Figure 4.10, identique à la figure 2.9). Une amélioration du système suffit rarement seule à satisfaire la fonction économique de l'entreprise vis-à-vis du marché. Il peut être conjointement nécessaire de procéder aux innovations-produits pour adapter la fonction d'usage du produit aux attentes des clients. Les fonctions techniques de veille du système et les fonctions techniques du produit (que nous qualifierons de fonctions de techniques de marketing⁴⁵), permettent de faire le lien respectivement entre le système et son environnement et entre le produit et son utilisateur. Enfin, les fonctions de conduite et de transformation, et les fonctions de réalisation permettent de pénétrer respectivement au cœur du système et au cœur du produit, pour agir directement sur leurs organes.

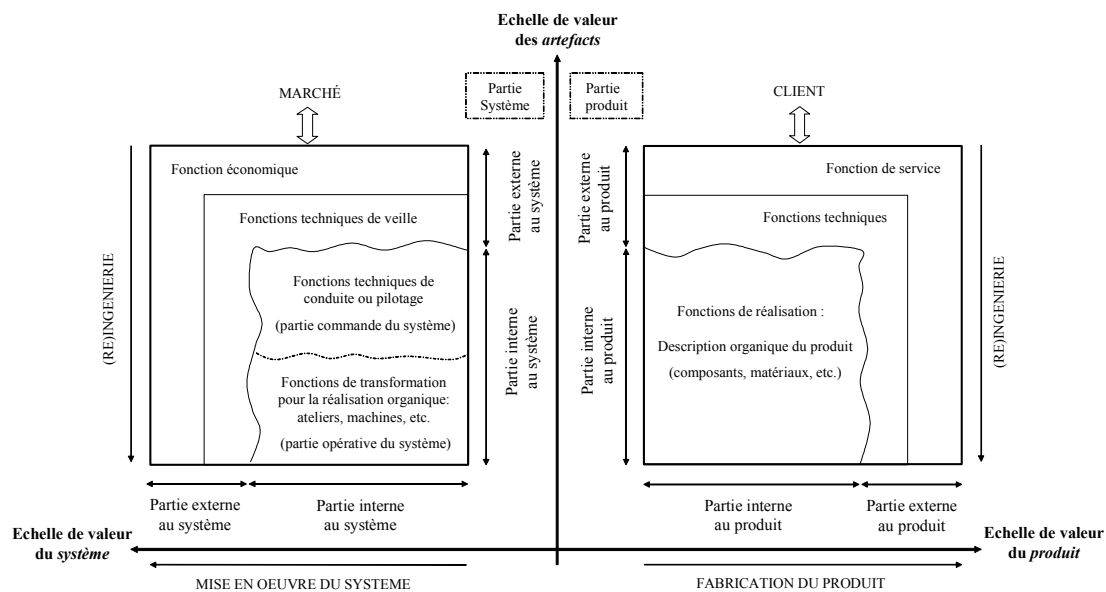


Figure 4.10 - Analogie Produit / Système

Si nous nous référons aux travaux de Girard [Girard et al, 1998], il existe deux inconnues principales dans le système de conception de produits, que sont l'objet technique de la conception, c'est-à-dire le produit à concevoir, et la transformation progressive de la définition de cet objet, c'est-à-dire le processus de conception. La transformation de l'objet s'opère en partant des besoins exprimés du client grâce à la fonction de service du produit, et dépend des ressources de conception disponibles (voir chapitre 2, § 3.3.1). La gestion de la performance en conception consiste donc à conduire simultanément et concouramment le processus de conception et l'évolution de la connaissance des produits, afin de satisfaire les objectifs fixés initialement à travers la fonction de service. A ces fins, il faut étudier non seulement le passage du cahier des charges à la définition du produit et de son procédé d'élaboration, mais aussi la planification des activités du processus de conception. Ceci amène à considérer deux plans de conduite, à savoir un plan objet qui permet la conduite du développement de la connaissance produit (objet technique de la conception), ainsi qu'un plan action pour la conduite des activités du processus de conception [Girard and Doumeingts, 1994].

⁴⁵ La fonction technique de marketing pour le produit est le pendant de la fonction technique de veille pour le système. Elle permet effectivement de mener des audits auprès des clients afin de définir les attentes de ces derniers, tandis que la fonction technique de veille permet de surveiller le marché afin de déterminer ses opportunités.

De manière duale, nous pouvons dire qu'il existe deux inconnues principales dans le système de ré-ingénierie des systèmes de production, que sont l'objet technique de la ré-ingénierie, c'est-à-dire tout ou partie du système lui-même, et la transformation de cet objet, c'est-à-dire le processus de ré-ingénierie. La transformation de l'objet s'opère en partant des besoins exprimés par la direction de l'entreprise au travers de la fonction économique, qui s'apprécie par rapport au marché. Cette transformation dépend de la structuration des ressources utiles à la ré-ingénierie qui sont disponibles (point de vue organique du système), ainsi que du fonctionnement de cette structuration (point de vue opérationnel du système), et doit satisfaire aux objectifs de performance du futur système définis à travers la fonction économique. La gestion de la performance en (re)conception de systèmes de production consiste donc à conduire simultanément et concouramment le processus de (re)conception du système et l'évolution de la connaissance organique et opérationnelle de ce système, afin de satisfaire les objectifs fixés initialement (Figure 4.11). A ces fins, il faut étudier non seulement le passage des cahiers des charges à la définition du nouveau système et des modifications que cela entraîne sur le système existant, mais aussi la planification des activités de ré-ingénierie.

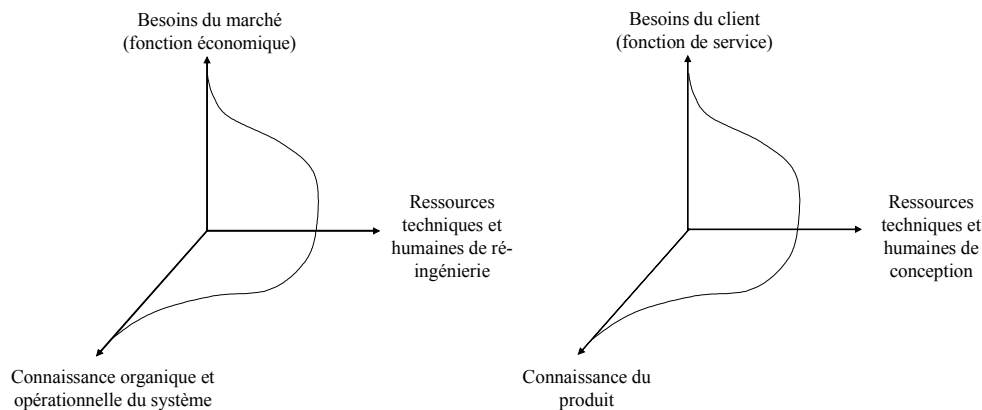


Figure 4.11 - Espaces d'évolution des processus de conception et de ré-ingénierie, inspirée de [Girard, 1999]

5.3.2. Gestion de la performance en conception et ré-ingénierie

La conduite de la conception peut être formalisée par double grille GRAI (structure GRAI - R&D) [Girard, 1999] correspondant à deux plans de conduite : un plan objet, qui permet la conduite du développement de la connaissance produit, et un plan action, pour la conduite des activités du processus de conception (Figure 4.12).

Le plan action est unique car relatif à l'ensemble des projets qui sont en cours de développement. Il regroupe l'ensemble des décisions de conduite, dites de planification. Les fonctions du plan action sont Gérer les Informations des Projets, Planifier et Gérer les Ressources. Trois niveaux de décomposition selon l'axe vertical sont identifiés : le niveau stratégique (long terme), le niveau tactique (moyen terme) et le niveau opérationnel (court terme) qui correspondent à une décomposition temporelle. Les décisions à caractère stratégique permettent de définir les buts à atteindre par le système de conception. Les décisions à caractère tactique permettent de mettre en place les ressources nécessaires pour assurer la transformation de la connaissance du produit conformément aux objectifs. Enfin, les décisions à caractère opérationnel permettent de lancer les activités du processus de conception. Les décisions prises dans ce plan sont des décisions de conduite de type planification. Le concept de cadre de décision est donc conservé pour assurer la coordination des centres de décisions.

Le plan objet est relatif à chaque projet. Il y a donc autant de plans objet que de projets. Un plan objet regroupe l'ensemble des décisions de conduite, dites de conception, et relatives à un projet. Les fonctions des plans objet sont Gérer les Entités Technologiques, Concevoir et Gérer les Besoins [Girard, 1999]. Trois niveaux selon l'axe vertical sont identifiés : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel qui correspondent à la nature des décisions du plan objet. Cependant, ce critère de décomposition n'est pas d'ordre temporel mais est relatif au niveau d'incomplétude sur la définition du produit. Les décisions à caractère stratégique permettent en effet de définir les problèmes de conception⁴⁶ qu'il faudra résoudre pour le projet considéré. Les décisions à caractère tactique permettent d'ordonner et de regrouper ces problèmes de façon à faciliter la recherche des plans d'activités. Enfin, les décisions à caractère opérationnel permettent de définir les plans d'activités qui sont susceptibles de satisfaire aux problèmes. Les décisions prises dans ce plan sont des décisions de conduite de type conception.

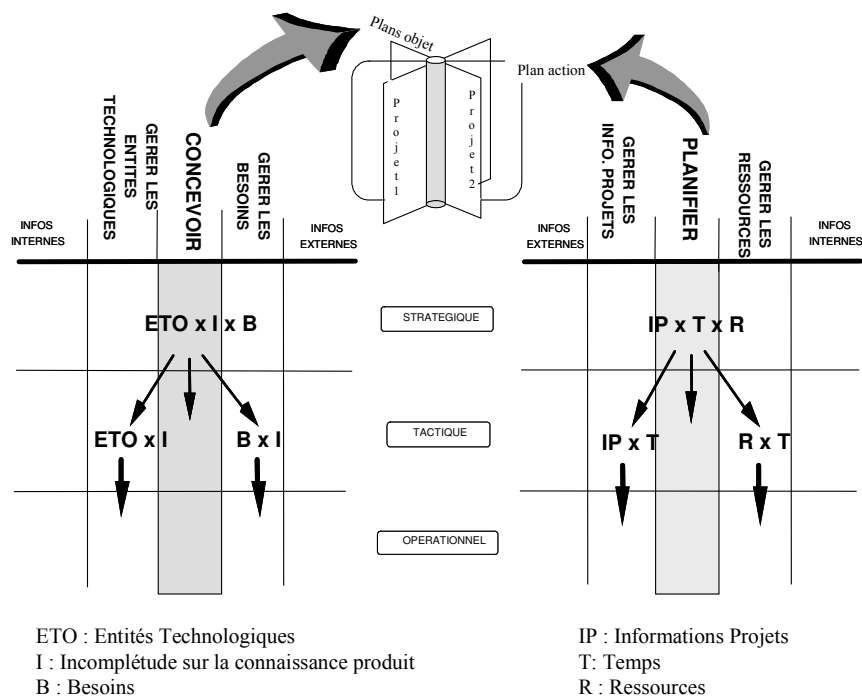


Figure 4.12 – La structure GRAI – R&D [Girard, 1999]

Un centre de conception se définit à l'intersection d'une fonction et d'un niveau dans le plan objet. Il correspond à l'organisation qui a en charge un processus de conception (transformation des besoins en définition du produit) dans le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs de conception (Figure 4.13). Chaque centre de décision de la fonction planification du plan action, identifié lors de la conception du système de conduite du système étudié, implique la création d'au moins un centre de conception. Ce dernier reçoit, du centre de décision dont il dépend, un cadre dit de conception. Le cadre de conception est l'ensemble des informations, pour une période de temps donnée, qui fixent les objectifs de conception, les moyens attribués et les objectifs de performance du centre de conception. Il reçoit également de celui-ci, pour contrôler le résultat de sa transformation, un délai et une valeur attendue. Cette valeur est définie selon un point de vue externe pour la satisfaction du client (coût et

⁴⁶ Les problèmes de conception correspondent à l'écart entre les besoins à satisfaire, i.e. le cahier des charges et la connaissance du produit.

qualité du résultat de conception), et selon un point de vue interne pour la performance de l'entreprise (coût et qualité de la transformation vis à vis du système industriel).

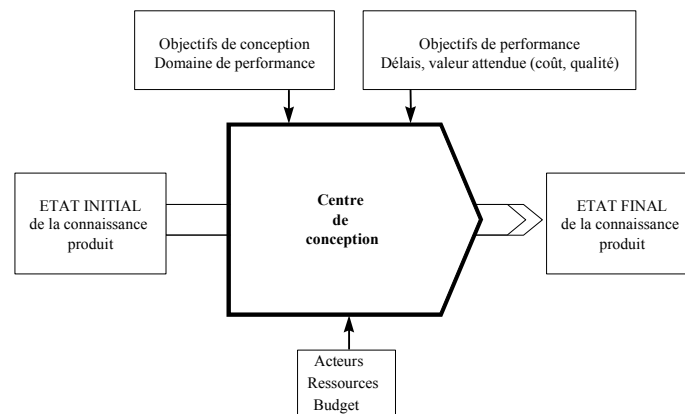


Figure 4.13 - Le centre de conception dans GRAI - R&D [Girard and Doumeingts, 2003]

Un centre de conception est piloté par un seul centre de décision de planification, alors qu'un centre de décision de planification peut piloter plusieurs centres de conception. Ainsi, il est possible de planifier le déclenchement des activités des centres de conception à chaque niveau de centre de décision. L'autonomie de chaque centre de conception assure la simultanéité dans le processus alors que le pilotage par un centre de décision de planification, qui fixe le cadre des centres de conception qu'il pilote, assure la concourance. Enfin, chaque centre de conception peut, à son tour, être décomposé en centres de conception pilotés, chacun, par un centre de décision de planification de niveau inférieur, ce qui permet de maîtriser les interactions entre le processus de conception, la connaissance du produit et les décisions de conduite.

Le plan action doit tenir compte de l'ensemble des plans objet afin de synchroniser et de coordonner l'ensemble des décisions de type planification. Le concept de synchronisation consiste, pour chaque niveau décisionnel, à concevoir chaque projet (synchronisation dans un plan objet) et à planifier le déroulement de l'ensemble des projets (synchronisation dans le plan action).

Dans le souci de conserver le parallèle entre l'évolution du produit et du système, nous préconiserons deux plans pour la conduite de la ré-ingénierie des systèmes de production : un plan objet système, qui permet la conduite du développement de la connaissance du système, et un plan action pour la conduite des activités du processus de ré-ingénierie.

5.3.3. Conduite de la ré-ingénierie des systèmes de production

Le plan action est unique car relatif à l'ensemble des projets de ré-ingénierie qui sont en cours de développement. Les fonctions du plan action sont Gérer les Informations des projets, Planifier, et Gérer les Ressources. Trois niveaux de décomposition selon l'axe vertical sont identifiés : le niveau stratégique, le niveau de ré-ingénierie et le niveau opérationnel qui correspondent à une décomposition temporelle. Les décisions à caractère stratégique permettent de définir les buts et les objectifs à atteindre par le futur système. Les décisions à caractère organique du niveau ré-ingénierie permettent de mettre en place les ressources nécessaires pour assurer la transformation de la connaissance du système, conformément aux objectifs exprimés par la fonction économique. Enfin, les décisions à caractère opérationnel permettent de lancer les activités du processus de ré-ingénierie. Les décisions du plan action sont donc classées, tout comme les décisions du plan action de la conduite de la conception, en décisions de conduite de type planification.

Le plan objet système est relatif à chaque intervention de ré-ingénierie et regroupe l'ensemble des décisions de conduite relatives à un projet. Les fonctions du plan objet système sont Gérer les besoins, Gérer les Entités Techniques, et Faire la ré-ingénierie. Trois niveaux selon l'axe vertical sont là encore identifiés : le niveau stratégique, le niveau de ré-ingénierie et le niveau opérationnel, qui correspondent à la nature des décisions du plan objet système. Ce critère de décomposition n'est pas d'ordre temporel mais est relatif au niveau d'incomplétude sur la définition du système. Les décisions à caractère stratégique permettent de définir les fonctionnalités du futur système. Les décisions à caractère organique permettent d'ordonner et de regrouper ces problèmes de façon à faciliter la recherche des plans d'activités lors des projets de ré-ingénierie. Enfin, les décisions à caractère opérationnel permettent de définir les plans d'activités qui sont susceptibles de satisfaire aux problèmes (notamment par l'identification de toutes les ressources flexibles du système de production). Les décisions propres à ce plan sont des décisions de conduite de type planification. La figure suivante illustre ces propos.

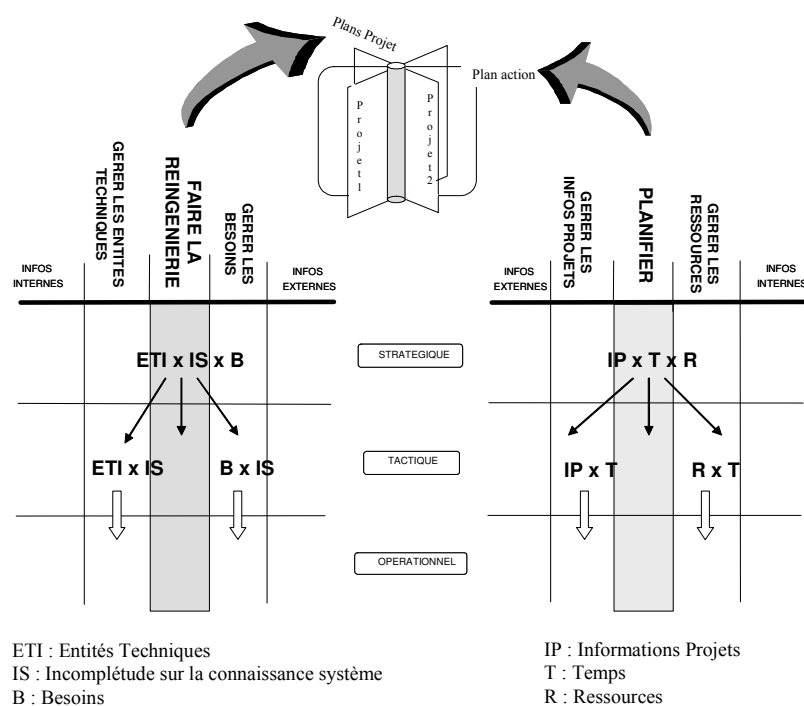


Figure 4.14 – Structure GRAI pour la ré-ingénierie des systèmes de production, inspirée de [Girard, 1999]

Un centre de ré-ingénierie se définit à l'intersection d'une fonction et d'un niveau dans le plan objet système. Il correspond à l'organisation qui a en charge un processus de ré-ingénierie dans le but de satisfaire la fonction économique (Figure 4.15). Chaque centre de décision de la fonction planification du plan action, identifié lors de la conception du système de conduite du système étudié, implique la création d'au moins un centre de ré-ingénierie. Ce dernier reçoit, du centre de décision dont il dépend, un cadre dit de ré-ingénierie. Le cadre de ré-ingénierie est l'ensemble des informations, pour une période de temps donnée, qui fixent les objectifs de ré-ingénierie, les moyens attribués et les objectifs de performance du centre de ré-ingénierie. Il reçoit également de celui-ci, pour contrôler le résultat de sa transformation, un délai et une valeur attendue, définie grâce aux IP-Modèle organique et opérationnel.

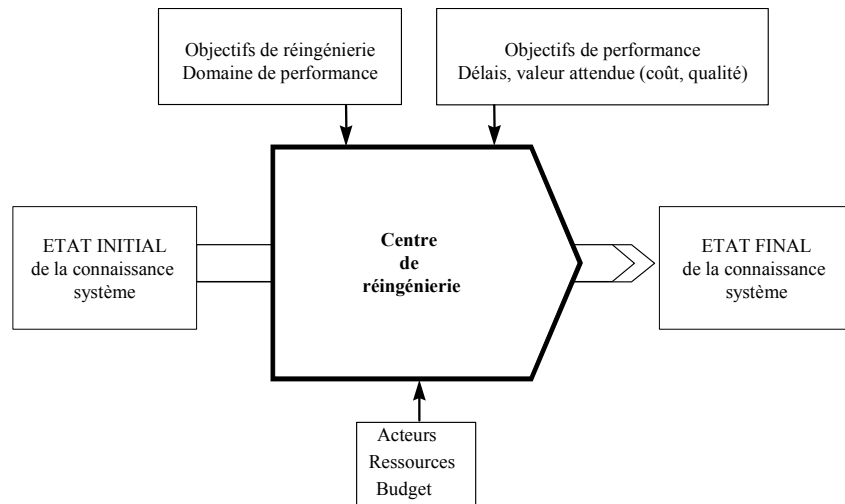


Figure 4.15 - Le centre de ré-ingénierie

Le lien entre les plans action et objet système de la ré-ingénierie est analogue au lien entre les plans action et objet de la conception. Le plan action doit donc tenir compte de l'ensemble des plans objet système afin de synchroniser et de coordonner l'ensemble des décisions de type planification. Le concept de synchronisation consiste, pour chaque niveau décisionnel, à concevoir chaque projet (synchronisation dans un plan objet système) et à planifier le déroulement de l'ensemble des projets (synchronisation dans le plan action).

5.4. Synthèse

Dans ce paragraphe, nous avons étendu les concepts du modèle GRAI relatifs à la gestion de la production à la gestion de l'évolution d'un système de production. A ces fins, nous avons dans un premier temps proposé une grille « globale » de l'évolution d'un système comprenant les trois niveaux de la gestion de l'évolution, à savoir les niveaux de pilotage stratégique, de ré-ingénierie et d'exploitation. Le niveau de pilotage stratégique permet de maintenir la place de l'entreprise dans le marché, par le déclenchement de projets d'amélioration du système (augmentation des ventes, diminution du délai de production, accroissement de la qualité des produits, etc.). Cette amélioration consiste alors en un projet de ré-ingénierie visant à remanier tout ou partie du système. Cependant, la ré-ingénierie n'est pas la seule variable d'action permettant d'améliorer les performances du système. En effet, la compétitivité d'une entreprise passant par une évolution conjointe des produits et des systèmes de production, la conception ou reconception de produits permet d'améliorer, au même titre que la ré-ingénierie du système, la fonction économique. Nous avons donc repris les notions de la structure GRAI – R&D permettant de représenter le système de conduite de la conception, pour modéliser le système de conduite de la ré-ingénierie. Les décisions issues du niveau pilotage stratégique viennent alors piloter le remaniement du produit et / ou du système. Une fois les projets de remaniement mis en œuvre, il s'agit enfin de venir exploiter le nouveau système. Cette exploitation, qui consiste à gérer la production, s'effectue au travers de la grille GRAI classique, elle-même pilotant le système physique (Figure 4.16).

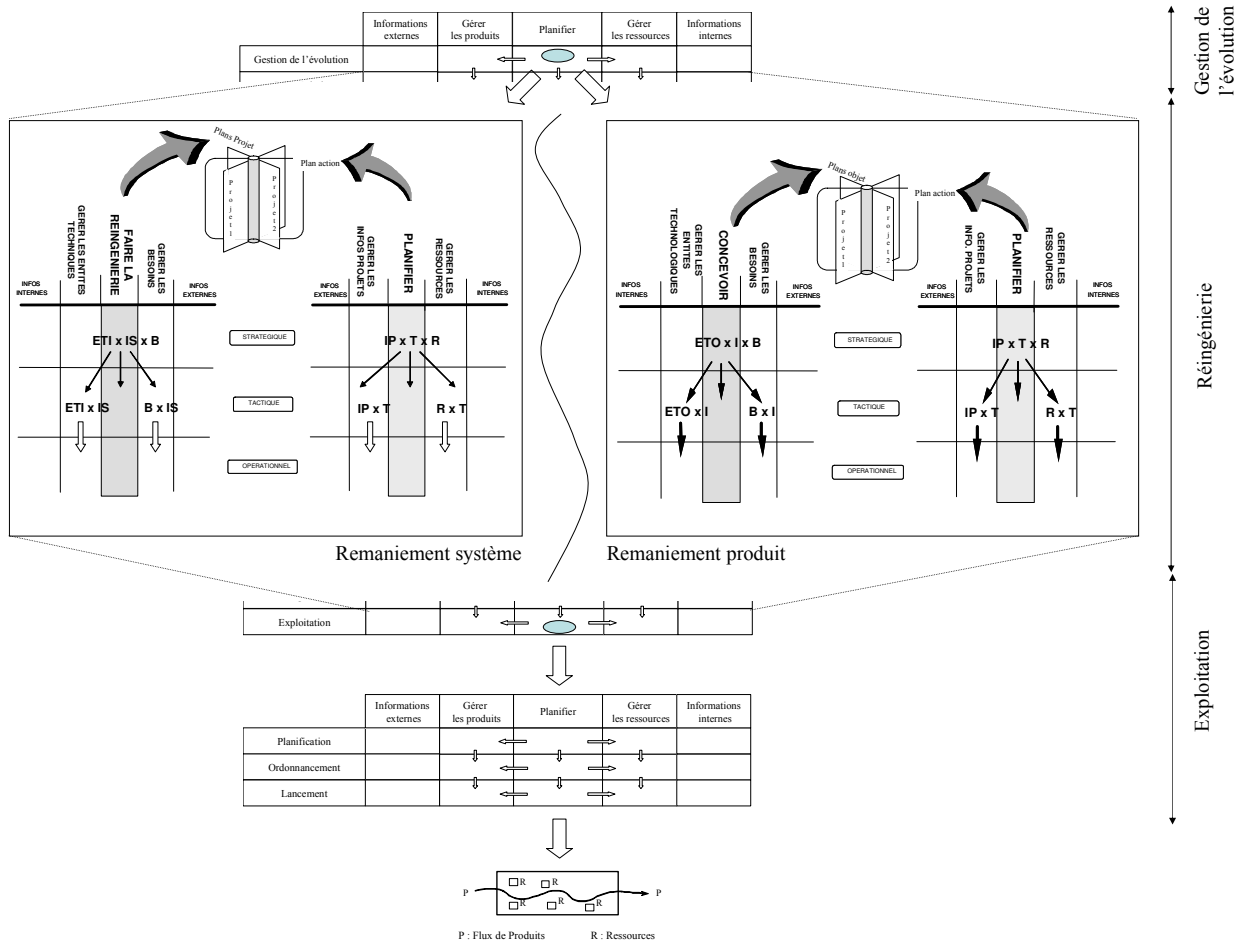


Figure 4.16 - Gestion multi – niveau de l'évolution des systèmes de production. Formalisation par grilles GRAI

6. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié l'usage des modèles dans la démarche de gestion de l'évolution des systèmes de production. Pour ce faire, nous avons en premier lieu considéré celle-ci selon trois niveaux : le pilotage stratégique, la ré-ingénierie et l'exploitation du système. Chacun de ces niveaux s'appuie sur différentes vues du système (vue fonctionnelle, organique ou opérationnelle), et utilise des indicateurs de performance système et modèle (IP-Système et IP-Modèle) plus ou moins agrégés, afin de valider les spécifications des états futurs du système. Nous avons à ce propos insisté sur l'importance d'analyser la criticité des indicateurs de performance (qualifiés d'événements en cas de défaillance), qui permet de définir la priorité des décisions correctrices à déclencher à chacun des trois niveaux de pilotage. L'analyse de criticité s'effectue grâce à la méthode AMDEC, qui permet d'évaluer l'impact des événements sur divers aspects du système : fonctionnalités, structure, fonctionnement. Les actions correctrices consistent alors à réactualiser le ou les modèles concernés par le changement - ainsi que les différents indicateurs de performance associés, devenus obsolètes - et, sur ces bases, à proposer de nouveaux scénarios de planification. Enfin, afin de conserver une vue globale du processus d'évolution du système, nous avons étendu les concepts du modèle GRAI relatifs à la gestion de la production à la gestion de l'évolution d'un système de production. Le modèle obtenu offre subséquemment une double décomposition fonctionnelle et temporelle du processus d'évolution des systèmes de production. La décomposition fonctionnelle met en évidence les trois fonctions principales de la gestion de l'évolution d'un système de production : Gérer les 'produits' de l'évolution, Gérer les 'ressources' de l'évolution et Planifier les activités assurant l'évolution du système. La décomposition temporelle distingue les niveaux décisionnels caractérisant les bases de temps de la planification de l'évolution d'un système de production, tels que définis précédemment. Chaque centre de décision de ce modèle manipule des données propres au niveau de pilotage et à la fonction auxquels il appartient. La mise à disposition, au moment opportun, d'informations sémantiquement adaptées à ces centres de décision, apparaît donc comme une nécessité. Par analogie avec les flux matériels, nous dirons que le modèle de conduite GRAI étendu à la gestion de l'évolution nécessite l'intégration d'une logistique d'information en son sein. En conséquence, le chapitre 5 se consacre à l'étude de cette logistique d'information, en vue du pilotage.

Chapitre

5

LA LOGISTIQUE D'INFORMATION POUR LE PILOTAGE
DU CYCLE DE VIE DU SYSTEME DE PRODUCTION

Sommaire Chapitre 5

La logistique d'information pour le pilotage du cycle de vie du système de production

1. INTRODUCTION	152
2. LE SYSTEME D'INFORMATION	152
2.1. Définitions	152
2.2. Rôle de l'information vis-à-vis de la décision	154
3. L'INFORMATION DANS LA CONDUITE DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	156
3.1. Informations dédiées aux niveaux de pilotage	156
3.1.1. Les informations externes	156
3.1.2. Les informations internes	157
3.2. Chaîne de mesure et chaîne d'action	157
3.3. Conclusion	159
4. PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES (PTD)	160
4.1. Rôle du PTD	160
4.2. Définition du PTD	162
4.3. Activités du PTD	164
4.4. Intégration du PTD dans les réseaux GRAI	165
5. CONCLUSION	168

1. INTRODUCTION

Le pilotage de l'évolution du système de production aux différents niveaux développés dans le chapitre 4 nécessite de mettre à disposition des décideurs les informations leur permettant d'assumer leur tâche de veille, d'analyse et de décision en contrôlant la portée de la stratégie choisie [Léveillé, 2000]. Il s'agit d'une variété d'informations formelles et / ou informelles, qualitatives et / ou quantitatives [O'Brien, 1995], permettant de situer la problématique de la décision et de connaître l'état du système piloté, mais aussi de données techniques et commerciales en grand nombre. Ces dernières sont, pour partie, générées par le système piloté (gammas de fabrication, disponibilités des ressources, suivi de production), et pour partie en provenance de l'environnement du système (clients, sous-traitants, fournisseurs, donneurs d'ordres).

La gestion de l'évolution du système de production, modélisée au chapitre 4 par une grille GRAI étendue, nécessite la mise en place des flux informations requis par chacun des niveaux de pilotage. La mise à disposition, au moment opportun, d'informations sémantiquement adaptées à la nature de la décision à prendre est un problème non trivial, ce qu'illustre le développement actuel des systèmes d'informations au sein de l'entreprise. Par analogie avec la maîtrise des flux matériels, nous utilisons le terme de *logistique d'information* pour désigner l'organisation des canaux véhiculant l'information du système et de son environnement vers les centres de décisions et entre les centres de décisions, mais aussi les processus de traitement de l'information visant à conférer à celle-ci la sémantique requise par les centres de décision. Ce dernier point est à l'évidence lié à la problématique d'*agrégation* de l'information.

L'objet de ce chapitre est de compléter la modélisation GRAI du pilotage du cycle de vie du système de production par la prise en compte de la logistique d'information nécessaire au pilotage. Nous développerons la notion de Processus de Traitement des Données (PTD) et proposerons une modélisation prenant notamment en compte les traitements d'agrégation de l'information. Le lecteur trouvera dans l'Annexe 2 l'illustration de nos propositions à un cas industriel.

2. LE SYSTEME D'INFORMATION

2.1. Définitions

Vernadat définit le système d'information (SI) comme l'ensemble des données et informations utilisées, stockées ou traitées par les besoins d'utilisateurs ou d'applications d'une entreprise [Vernadat, 1999]. La donnée est un enregistrement de la mesure ou du repérage d'un objet ou d'un événement [Mélèse, 1992], et ne devient information que lorsqu'elle est mise en relation avec d'autres données, puis intégrée dans un ensemble de relations, dans un contexte donné [Léveillé, 2000].

L'information en soi n'a toutefois qu'un intérêt très relatif, et ne vaut que parce qu'elle permet de constituer, de reconstituer ou d'enrichir une connaissance sur un sujet. La connaissance est en effet « *le résultat de l'interprétation par un récepteur d'un ensemble d'informations qu'il restructure dans les termes de son propre code, en vue de les intégrer aux connaissances qu'il a déjà acquises* » [Caussanel et Chouraqui, 1999]. Les connaissances de l'entreprise comprennent, d'une part, *des savoirs spécifiques qui caractérisent ses capacités de gouvernance, d'étude, de réalisation, de vente et de support de ses produits et de*

ses services, et, d'autre part, des savoir-faire individuels et collectifs qui caractérisent ses capacités d'action, d'adaptation et d'évolution. Les connaissances de l'entreprise sont constituées d'éléments tangibles (bases de données, procédures, plans, modèles, algorithmes, documents d'analyse et de synthèse) et d'éléments immatériels (habiletés, tours de mains, « secrets de métiers », routines, historique des contextes décisionnel et environnemental) [Grundstein, 2002]. Enfin, les connaissances explicites constituent pour partie des ressources de compétences. La compétence est « la mobilisation d'un ensemble de savoirs hétérogènes, aboutissant à la production d'une performance reconnue, par rapport à un environnement donné et dans le cadre d'une activité finalisée » [Bonjour et Dulmet, 2002]. Elle inclut la capacité et l'habileté à exercer une activité [Birdir, 2000] [Lasnier, 2000]. La notion de capacité est alors souvent précisée par des verbes d'actions, tandis que l'habileté est plus qualitative et renvoie aux talents particuliers des personnes à exercer l'activité [Alsène et al, 2002]. Les connaissances et compétences de l'entreprise occupent une place importante: celle du capital immatériel de toute organisation [Vergnaud et Harzallah, 2002]. La figure 5.1 résume les liens entre donnée, information, connaissance et compétence.

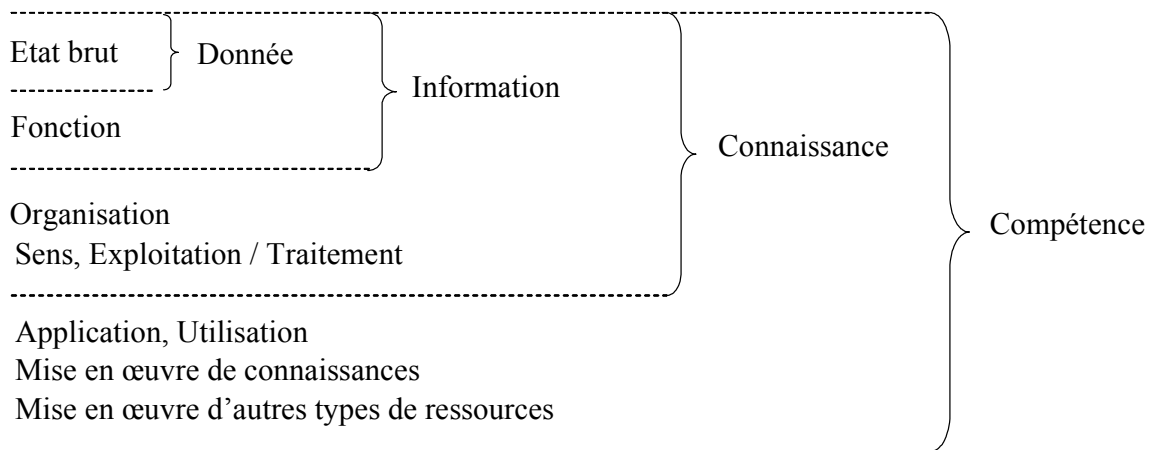


Figure 5.1 - Liens entre donnée, information, connaissance et compétence [Vergnaud et Harzallah, 2002], adaptée de [Gardoni, 1999]

Au vu de la littérature, nous retiendrons essentiellement les notions suivantes :

- Une *donnée* est un renseignement factuel -pouvant résulter d'une mesure- consigné sur un support déterminé (fiche, mail, etc.), nécessaire mais non suffisant pour une prise de décision.
- Une *information* est un élément cognitif interprétable résultant de l'interprétation de données. C'est un élément nécessaire et suffisant pour la prise de décision.

Données et informations se distinguent donc d'un point de vue sémantique. Leur point commun est qu'il s'agit d'éléments *contextuels* (relatifs d'une part au système piloté, d'autre part à l'environnement de celui-ci) que les décideurs ne sauraient 'inventer' en dépit des connaissances et des compétences qui sont les leurs.

- A contrario, les *connaissances* acquises et les *compétences* qui en manifestent la bonne utilisation résultent de processus de capitalisation d'expériences et d'apprentissage de la part des décideurs. A ce titre, connaissances et compétences constituent des caractéristiques *structurelles* de la décision.

Ce chapitre traite de l'origine, du traitement et de l'organisation des flux d'informations qui irriguent les différents niveaux de pilotage. Beaucoup d'aspects pourraient être ici considérés : stockage de l'information, modalités d'accès, mise à jour, etc. Toutefois, nous nous focalisons sur le traitement des données et informations nécessaires à chaque centre de décision.

Nous employons par ailleurs le terme de logistique d'informations. Selon l'Association Française pour la Logistique⁴⁷, « la logistique est une fonction qui a pour but la mise à disposition au moindre coût de la quantité d'un produit, à l'endroit et au moment où une demande existe ». De manière analogue, la logistique d'information peut être définie comme une fonction dont le but est la mise à disposition, à un moment opportun, des informations adaptées à un centre de décision donné (Figure 5.2). C'est une organisation assurant les fonctions d'approvisionnement en données, de transformation de ces données en informations adaptées, et de distribution vers les centres de décision récipiendaires.

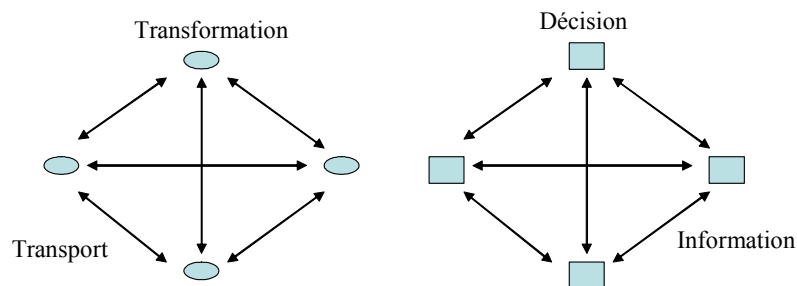


Figure 5.2 - Dualité logistique de flux matériels / logistique d'information

2.2. Rôle de l'information vis-à-vis de la décision

On peut définir la décision comme étant un acte par lequel un ou plusieurs décideurs opèrent un choix entre plusieurs « options » permettant d'apporter une solution satisfaisant des critères (techniques, économiques, sociologiques, etc.) à un problème donné. Or, ces options résultant d'une décision constituent elles-mêmes des informations vis-à-vis des récipiendaires.

Les informations constituent donc à la fois les ingrédients contextuels amont et les résultats aval d'une décision. Plus précisément, l'information joue les rôles suivants :

- En amont (renseignement) : informer le décideur sur l'état du système piloté, sur ses dérives par rapport à un état de référence. A ce titre, les IP-Système et les IP-Modèle font naturellement partie des informations internes ; en complément, l'observation de l'environnement du système est source d'informations externes.
- En aval (cadre de décision) : toute décision constitue en tant que telle, vis-à-vis de des centres de décision destinataires, l'émission d'une information ou d'un ensemble d'informations ('cadre de décision' du modèle GRAI) définissant pour ces centres les objectifs, contraintes et critères de décision ;
- En aval (évaluation et traçabilité) : l'apprentissage des bonnes décisions fait partie intégrante de la pratique du pilotage. Il faut capitaliser le retour d'expérience par l'évaluation *a posteriori* de l'efficacité des décisions prises dans le passé. C'est, là encore, le rôle des IP-Système.

⁴⁷ <http://www.aslog.org/>

La gestion de l'entreprise suppose donc la mise à disposition d'un ensemble d'informations adaptées (disponibles, pertinentes, fiables, récentes) à une prise de décision efficace et opportune. Toutefois, l'un des problèmes rencontrés par un décideur est la limitation de la masse des informations, qu'il est indispensable de savoir classer et hiérarchiser selon leur degré d'importance, pour n'en retirer que les éléments utiles à la prise de décision. Tout décideur humain possède en effet une limite cognitive pouvant être exprimée en quantité d'informations [Doumeingts et al, 1998]. Au-delà de cette limite, le décideur est surinformé et ses capacités d'interprétation de la situation sont dégradées. Nous avons mis en évidence, dans le chapitre précédent, plusieurs niveaux de pilotage pour la gestion de l'entreprise : pilotage stratégique, ré-ingénierie, et exploitation. Cette structuration du système de pilotage induit donc elle-même une structuration des informations. Nous distinguerons :

- Les informations internes et externes au système susceptibles d'alimenter le raisonnement stratégique en vue de décider des actions (diversification / spécialisation de l'entreprise, innovation, etc.) permettant de tendre vers les objectifs stratégiques ;
- Les informations internes et externes au système susceptibles d'alimenter le pilotage de la ré-ingénierie système et produit en vue d'évaluer et de sélectionner les meilleurs scénarios de réalisation permettant de tendre vers les objectifs de la ré-ingénierie, eux-mêmes préalablement définis par le niveau stratégique ;
- Les informations internes et externes au système susceptibles d'alimenter le pilotage opérationnel du système de production en vue d'établir les meilleurs modes d'exploitation permettant de tendre vers les objectifs d'exploitation, eux-mêmes préalablement définis lors de la conception du système de production.

Un décideur du niveau stratégique englobe donc toutes les informations propres à la conduite de l'évolution d'un système de production, qui inclut toutes les informations propres à la gestion de la production, auxquelles s'ajoute des données externes relatives au marché et aux activités des acteurs partenaires (fournisseurs, sous-traitants, clients). La maîtrise du volume d'information va de pair avec la nécessité d'agréger les données utilisées dans la résolution de chaque type de décision (cf. Figure 5.3). Ainsi, un décideur en charge du niveau exploitation (chef d'atelier, responsable ligne de fabrication) utilise-t-il une information très détaillée dans un espace de prise de décision restreint (zone 1, Figure 5.3), tandis qu'un décideur en charge du niveau pilotage stratégique utilise des informations agrégées dans un espace de prise de décision très grand (zone 3, Figure 5.3).

Détail de l'information manipulée (D)

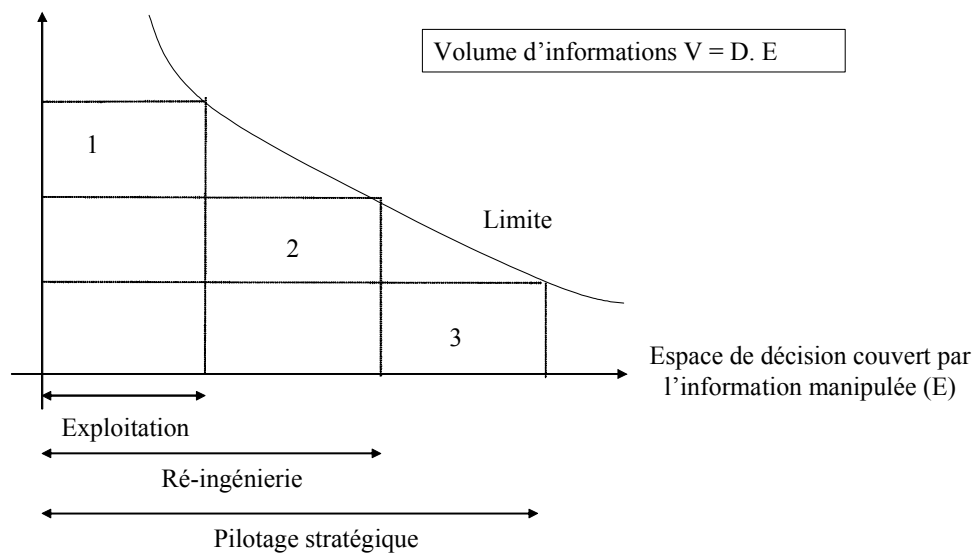


Figure 5.3- Limite cognitive d'un décideur, adaptée de [Doumeingts et al, 1998]

3. L'INFORMATION DANS LA CONDUITE DE L'EVOLUTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

3.1. Informations dédiées aux niveaux de pilotage

Considérons les trois niveaux de pilotage précédemment définis (Pilotage stratégique, Ré-ingénierie, Exploitation) et leur modélisation par une grille GRAI étendue à la gestion de l'évolution (chapitre 4, § 5). Cette grille comprend les colonnes informations externes et informations internes qui interfacent les centres de décisions avec le système d'information de l'entreprise. Nous étudions maintenant plus précisément la nature et le rôle de ces informations à chaque niveau de pilotage, en distinguant les informations endogènes (dont la source est le système piloté) et les informations exogènes (provenant de l'environnement du système piloté).

3.1.1. Les informations externes

- Au niveau pilotage stratégique : les informations externes doivent permettre d'assurer une *veille stratégique*, c'est-à-dire analyser le contexte environnemental de l'entreprise. Il s'agit en premier lieu d'observer les caractéristiques du marché (clientèle, partenaires et concurrents). De ce point de vue, la fonction marketing de l'entreprise permet de développer des programmes de sélection, de conquête, de développement et de fidélisation des clients cibles. Mais il s'agit également d'analyser les données relatives aux marchés des capitaux et de l'emploi. De telles informations permettent d'établir un diagnostic externe de l'entreprise, afin de juger son rôle en tant qu'acteur économique au sein du marché. La veille stratégique permanente de l'environnement de l'entreprise doit permettre un repérage de signes ou d'indices révélateurs de changements importants (tendance des ventes, parts de marché, etc.) afin de maintenir la fonction économique de l'entreprise.

- Au niveau Ré-ingénierie : les informations externes doivent permettre d'assurer une *veille technologique* renseignant l'entreprise sur les ressources extérieures disponibles lors du projet de reconception de tout ou partie de l'entreprise : offre en matériaux, procédés, et

équipements avancés, identification de bureaux d'étude, équipementiers fournisseurs et sous-traitants. Il s'agit de permettre une meilleure connaissance des possibilités du tissu industriel environnant l'entreprise, pour la mise en oeuvre du projet de ré-ingénierie produit et/ou système. Enfin, il faut considérer les contraintes de normalisation (standardisation) ou encore des contraintes légales relatives à l'interdiction de certains matériaux

- Au niveau exploitation : les informations externes doivent permettre d'assurer la *veille logistique*, c'est-à-dire surveiller les flux matière (approvisionnements, sous-traitance et expéditions) et les flux commerciaux (commandes, achats, facturation) entre le système et ses partenaires commerciaux. Ces informations sont nécessaires à la planification de l'activité opérationnelle de l'entreprise et à la définition des regroupements de commande et des campagnes économiques de production.

3.1.2. Les informations internes

- Au niveau pilotage stratégique : les informations internes doivent rendre compte de l'état général de l'entreprise pour analyser la chaîne de valeur de celle-ci et évaluer ses avantages compétitifs au sein du marché. De telles informations permettent de réaliser un diagnostic interne purement fonctionnel de l'entreprise afin de juger de ses aptitudes économiques. Il s'agit d'une analyse permanente des performances de l'entreprise, qui doit permettre un repérage de signes ou d'indices révélateurs de dysfonctionnements profonds (capacité d'innovation insuffisante, obsolescence de l'outil de production, manque de formation du personnel, politique sociale inadaptée, etc.).

- Au niveau ré-ingénierie : les informations internes doivent rendre compte de l'état des ressources participant à la reconception du système et ou des produits (équipes-projets, Bureau d'Etudes, Bureau des Méthodes) et du suivi des projets dans leur différentes phases : pré-étude, évaluation des solutions alternatives, développement et implémentation.

- Au niveau exploitation : les informations internes permettent d'effectuer le suivi de la production (niveaux des stocks et des en-cours, temps de fabrication, délai de livraison), le suivi de la qualité (taux de rebut) et le suivi de la disponibilité des ressources (absences de personnel, pannes d'équipements, etc.).

3.2. Chaîne de mesure et chaîne d'action

Nous examinons ici les rapports entretenus entre les trois niveaux de pilotage et le système opérant vu par chacun de ces niveaux. Au niveau opérationnel (pilotage d'exploitation), le système piloté est le système de production réel. Au niveau du pilotage structurel (ré-ingénierie), le système opérant est constitué des acteurs de la ré-ingénierie qui, par leur action, font migrer la structure du système de production. Au niveau du pilotage stratégique, le système opérant est l'ensemble des moyens d'analyse stratégique d'innovation et de financement de l'entreprise.

Chaque niveau de pilotage contrôle la dynamique du système piloté par une « chaîne de mesure », qui alimente le pilotage en informations contextuelles relatives au système opérant et à son environnement et une « chaîne d'actions » qui répercute les décisions vers le système opérant et son environnement.

Le rôle de la chaîne de mesure est de procurer aux centres de décision situés aux différents niveaux de pilotage les tableaux de bord regroupant l'ensemble nécessaire et suffisant des informations internes et externes requises, telles que définies au § 3.1.

La chaîne de mesure peut être figurée dans la grille GRAI étendue introduite au chapitre 4, § 5.2.3 (Figure 5.4).

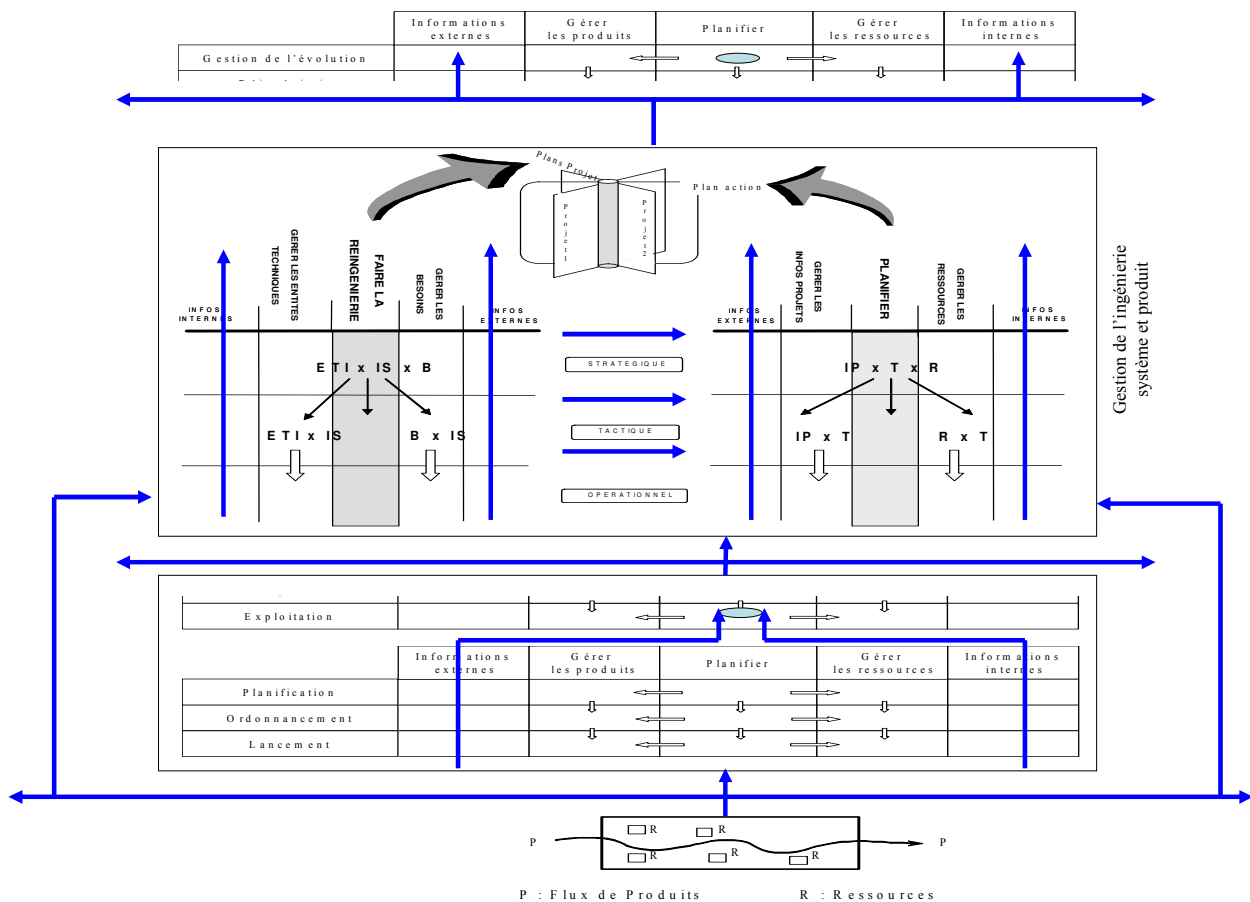


Figure 5.4 – La chaîne de mesure pour le pilotage de l'évolution du système de production

Le rôle de la chaîne d'action (Figure 5.5) est de lier les différents niveaux décisionnels par, en interne, la diffusion descendante des objectifs et cadres de décision et, en externe, par des commandes de prestations diverses.

Les décisions internes figurent dans la grille GRAI étendue (Figure 5.5). Chaque centre de décision du niveau pilotage stratégique de la grille globale pour la conduite de l'évolution émet un cadre de décision vers un centre de décision de la fonction planification du plan action du système de conduite de ré-ingénierie. Chaque centre de décision de la fonction planification du plan action implique alors la création d'au moins un centre de ré-ingénierie. Ce dernier reçoit, du centre de décision dont il dépend, un cadre de ré-ingénierie. Chaque centre de ré-ingénierie provoque alors la reconception de tout ou partie de la structure du système. Il s'agit enfin d'exploiter le système obtenu.

Les décisions externes émises par les trois niveaux de pilotage sont les suivantes :

- Au niveau du pilotage stratégique, il s'agit des commandes d'études de marché, de tout autre consultation juridique ou financière, et des négociations de partenariat avec d'autres acteurs économiques.

- Au niveau du pilotage structurel, il s'agit des commandes d'études extérieures, ainsi que, en phase d'implémentation, de commandes de prestations d'intégration. L'organisation des réseaux de partenariat et la négociation des rôles des acteurs dans cette organisation participent également des initiatives de pilotage structurel.
- Au niveau du pilotage opérationnel, il s'agit des commandes de fournitures, de prestations de sous-traitance, ou de tout autre prestation externalisée d'exploitation (notamment, entretien et maintenance) ;

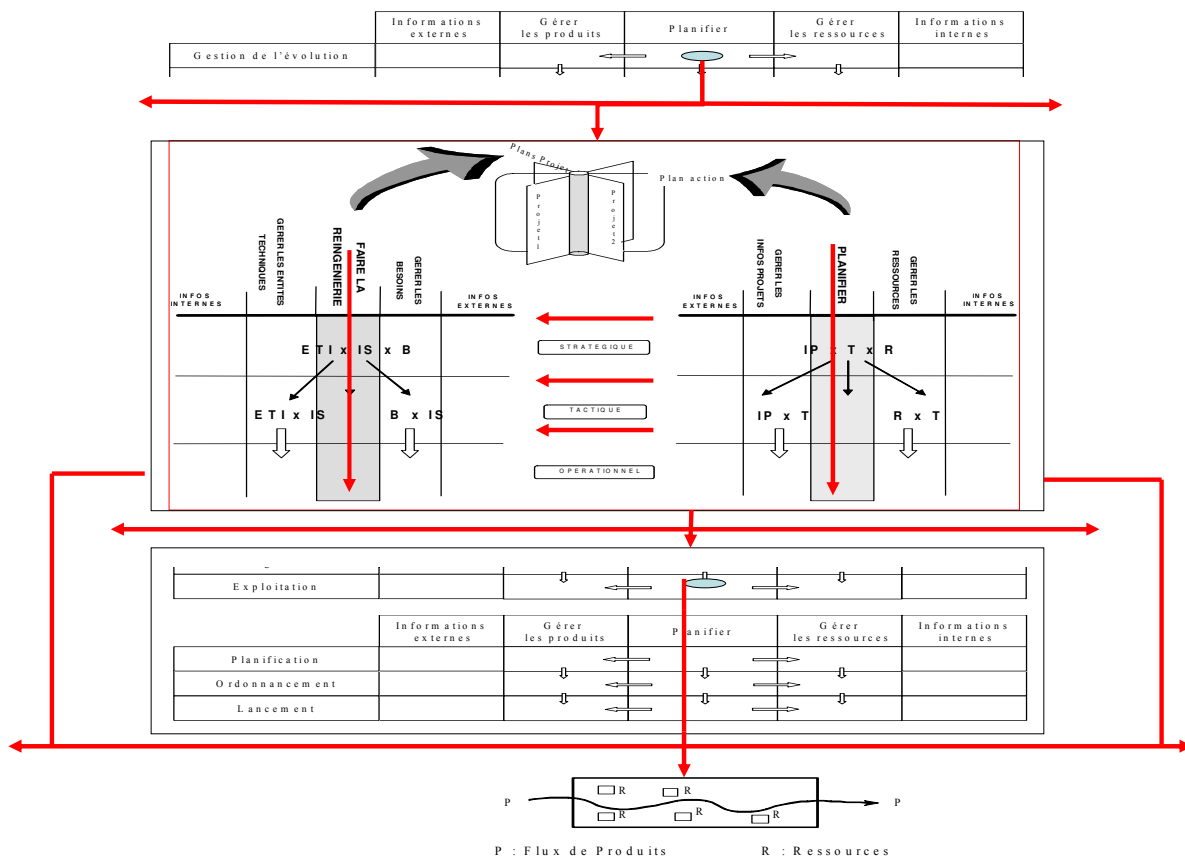


Figure 5.5 – La chaîne d'action pour le pilotage de l'évolution du système de production

3.3. Conclusion

L'information circulant dans l'entreprise et en provenance ou à destination de son environnement peut être structurée en référence avec les différents niveaux de pilotage intervenant dans le cycle de vie.

La qualité des informations alimentant les centres de décision est naturellement un facteur important pour l'efficacité du pilotage. Mather suggère de s'assurer de la validité de ces informations non pas seulement en essayant d'évaluer ou de mesurer la qualité des données elles-mêmes, mais en améliorant le processus qui transforment ces données en informations [Mather, 1988].

C'est l'objet du paragraphe suivant que d'analyser et de modéliser le processus de traitement des données au sein de l'entreprise, dont résulte la mise à disposition des informations requises par les centres de décision.

4. PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES (PTD)

Ce paragraphe s'attache à formaliser le Processus de Traitement des Données (PTD), en d'autres termes la chaîne de valeur ajoutée informationnelle, par lequel les données brutes issues de la surveillance du système ou de l'environnement de l'entreprise sont transformées en informations-clés utilisables par les centres de décision. Nous chercherons à intégrer la problématique d'agrégation de l'information -et certains résultats du laboratoire relatifs à ce thème- à la modélisation par grille GRAI du pilotage de l'entreprise.

4.1. Rôle du PTD

Considérons, en référence à la grille GRAI étendue au pilotage du cycle de vie de l'entreprise, un centre de décision α , relevant de l'une des trois fonctions principales de la gestion de l'évolution d'un système de production, et amené à prendre une décision (Figure 5.6). Le centre de décision α reçoit un flux informationnel en provenance d'un centre β , ainsi qu'un cadre de décision en provenance du centre γ . Les flux issus de β et γ comportent des données qui doivent être traitées et transformées afin de faciliter la prise de décision du centre récepteur α .

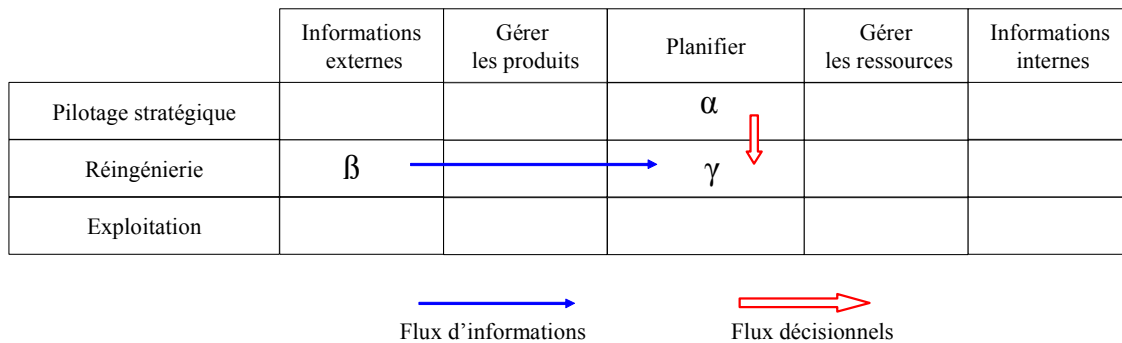


Figure 5.6 – Flux d'information requis par un centre de décision (Grille GRAI étendue)

Pour définir quelles sont les fonctions que doit réaliser le PTD, nous utilisons la méthode APTE [De la Bretesche, 2000]. Cette méthode, qui permet de guider la conception d'un produit ou d'un système sans préjuger des solutions de réalisation, conduit ici à établir un cahier des charges fonctionnel qui servira de base à la définition du PTD.

La première étape consiste à exprimer la fonction globale ('Bête à cornes' APTE, cf. Figure 5.7) du système étudié (ici, le PTD) en répondant à plusieurs questions :

- *A qui le PTD rend-il service ?* Il s'agit d'identifier le ou les destinataires du processus, ici le centre de décision α .
- *Sur quoi ou qui le PTD agit-il ?* Le PTD agit sur toutes les données présentes dans les flux informationnels reçus par α .
- *Dans quel but ?* Le PTD permet d'ajuster les données émises par β et γ pour le centre α , afin de faciliter sa prise de décision.

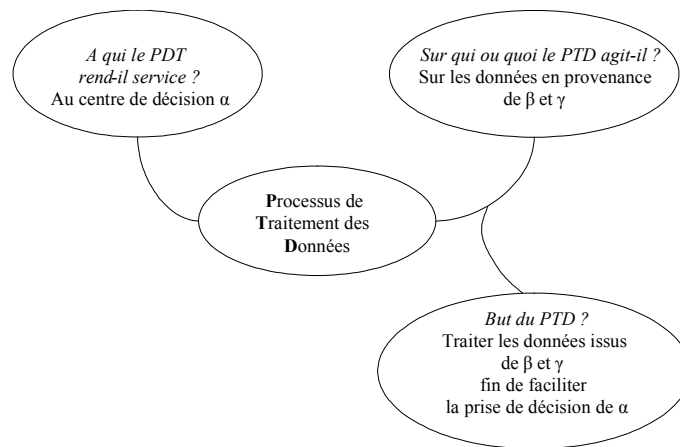


Figure 5.7 – « Bête à corne » du Processus de Traitement de Données

La deuxième étape consiste à placer le PDT dans son environnement et à recenser tous les éléments du milieu extérieur impliqués dans le processus : les interacteurs. On définit ainsi la 'pieuvre' APTE en identifiant les relations entre le PDT et ses interacteurs (Figure 5.8).

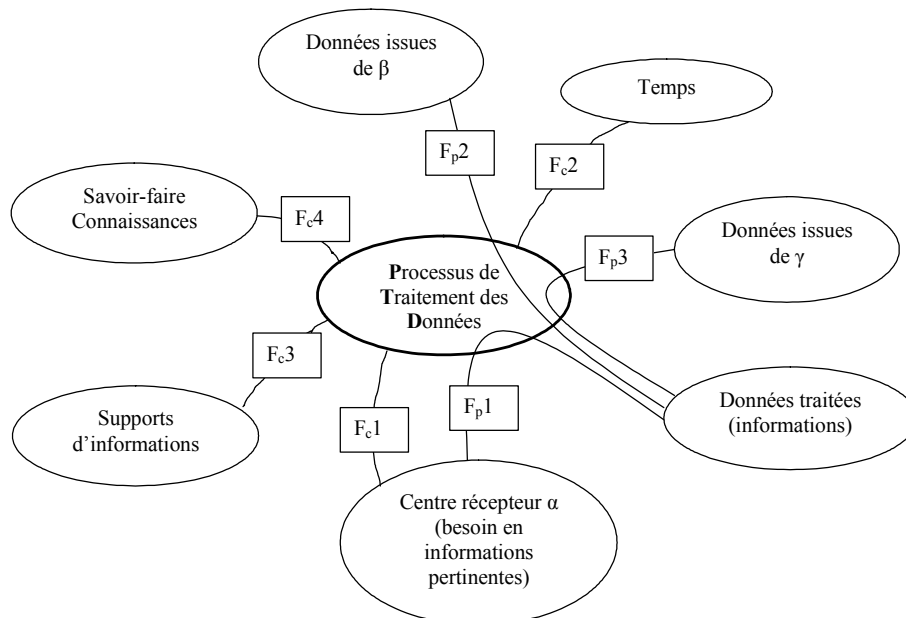


Figure 5.8 - « Pieuvre » APTE du Processus de Traitement de Données

On détermine ainsi les fonctions 'principales' et les fonctions 'contraintes' du PDT.

Les fonctions principales (Fp) relient le PDT à deux interacteurs, et identifient un service rendu par celui-ci. Les fonctions contraintes (Fc) relient le PDT à un seul interacteur, et, comme leur nom l'indique, mettent en évidence des contraintes d'utilisation dont il faudra tenir compte lors de la mise en place du PDT.

Les fonctions principales sont les suivantes :

- F_p1 : Répondre à un besoin en informations pertinentes exprimé par le centre de décision α , et ainsi faciliter sa prise de décision.
- F_p2 : Transformer les données issues de β en informations traitées à l'usage de α .
- F_p3 : Transformer les données issues de γ en informations traitées à l'usage de α .

Les fonctions contraintes sont les suivantes :

- F_c1 : Adapter le PTD au rôle du centre α (niveau décisionnel, fonction).
- F_c2 : Respecter un temps global de traitement (transformation puis transfert des informations) qui doit demeurer minime par rapport à la période (intervalle de temps au bout duquel les décisions prises par α sont remises en cause) du centre destinataire α .
- F_c3 : Utiliser les supports d'informations mis à disposition.
- F_c4 : Respecter les connaissances et savoir-faire des deux centres β et γ .

4.2. Définition du PTD

Un processus peut être décrit comme une séquence partiellement ordonnée d'étapes (sous processus ou activités), déclenchée par un événement [AMICE, 1993]. Sur la base du cahier des charges fonctionnel défini précédemment, le PTD peut être alors défini de la manière suivante [Sperandio et al, 2004b] (Figure 5.9) :

- Une séquence d'activités qui réalise les fonctions principales (F_p1 à F_p3),
- Des entités d'entrée alimentant le processus. Il s'agit du besoin en informations pertinentes pour un centre de décision, et de la réception de données brutes par ce même centre. Ces dernières proviennent d'autres centres de décision de la grille GRAI.
- Des entités de sortie, produites par le processus. Il s'agit de l'ensemble des informations traitées par les activités, qui vont permettre d'alimenter le centre de décision concerné en informations pertinentes.
- Des contrôles nécessaires pour respecter les fonctions contraintes (F_c1 à F_c4). Ici, il s'agit des objectifs de la décision du centre destinataire des informations, ainsi que les horizon et période de ce même centre.
- Des ressources (techniques ou humaines) permettant de réaliser les activités : experts, supports d'informations, savoir-faire, connaissances, etc.

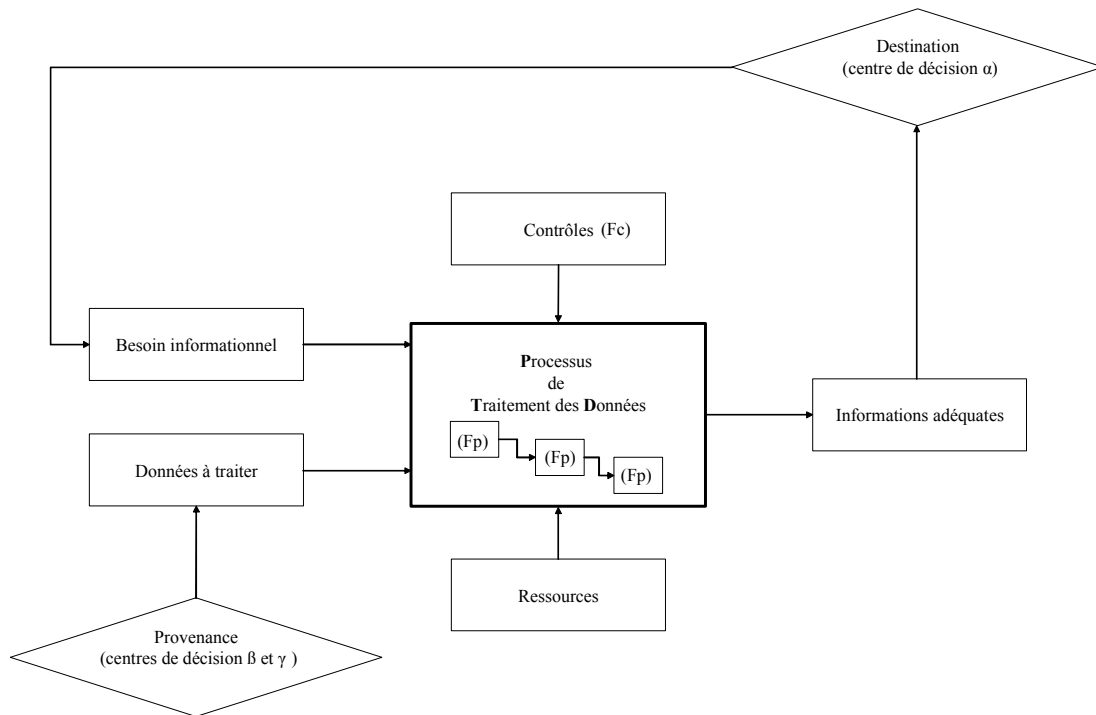


Figure 5.9 – Le Processus de Traitement des Données

Le PTD s'inscrit dans le processus de prise de décision. Celle-ci nécessite en effet d'identifier les sources internes et externes à l'entreprise susceptibles de fournir des informations utiles. La prise de décision se décompose en plusieurs étapes (Figure 5.10) :

- Analyse de l'objectif : cette première étape vise à définir de manière précise et formulable l'objet de la prise de décision (sur quoi porte la prise de décision), et détermine par là-même un besoin informationnel.
- Traitement des informations : cette étape consiste à traiter les données amenées à intervenir dans la prise de décision ;
- Analyse des informations obtenues : cette étape permet de définir un ensemble d'options susceptibles de fournir une réponse au problème posé, et d'accéder aux connaissances de l'entreprise ;
- Evaluation des scénarios : cette étape consiste à effectuer la comparaison et l'évaluation des options précédemment identifiées, afin d'en évaluer les coûts et gains probablement engendrés, ainsi que leur réalisabilité.
- Décision : cette étape consiste à sélectionner une des options évaluées à l'étape précédente.
- Action : cette dernière étape est la mise en œuvre de la solution choisie.

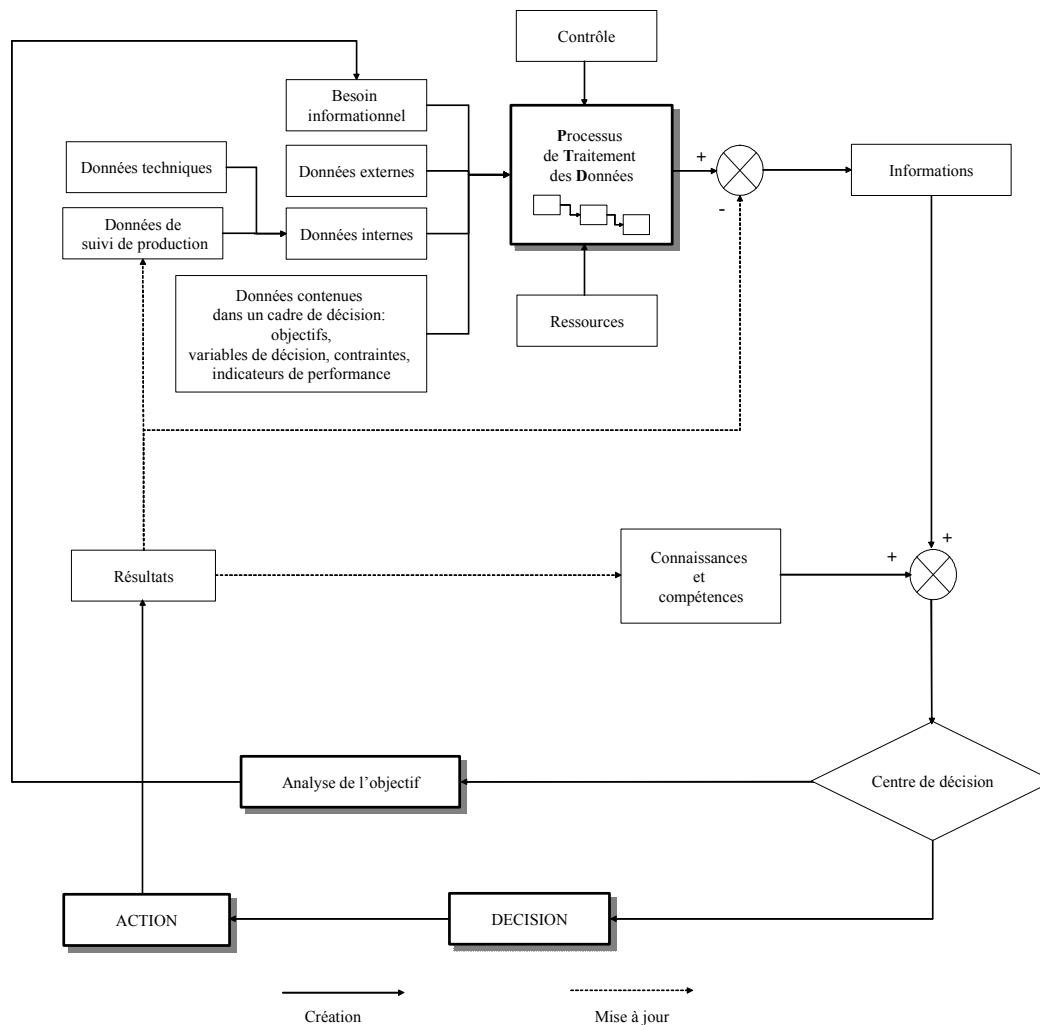


Figure 5.10 – Le PTD dans l'environnement de prise de décision

4.3. Activités du PTD

Le traitement de données est en soit un domaine assez complexe. Curtis classe les différents types de traitement en classification, réarrangement ou assortiment, agrégation, calcul, et sélection de données [Curtis, 1989]. Zolghadri se concentre sur l'étape d'agrégation, qu'il découpe en trois phases : partition, renseignement et réduction [Zolghadri et Bourrières, 2003].

Nous proposons six activités génériques au sein du PTD : partition, renseignement, collecte, intégration, réduction et archivage des données. Ces six activités ne sont pas systématiquement présentes et dépendent du type de donnée à traiter ainsi que de la problématique de la décision. En référence aux réseaux GRAI, nous les considérons comme activités de décision ou d'exécution.

- L'activité de partition consiste à subdiviser l'ensemble des données disponibles en sous-ensembles de natures différentes : données externes, données internes de suivi de production, données décrivant les ressources, les produits et la manière de les transformer. Chaque catégorie – famille, classe - ainsi obtenue possède alors des caractéristiques exclusives.

- L'activité de renseignement sert à valuer chaque donnée au sein de sa famille, en lui associant une variable spécifique (de performance, par exemple).

- Collecte : les données statiques (données décrivant les ressources, les produits et la manière de les transformer) font partie des connaissances et sont donc à disposition. La collecte des données dynamiques s'effectue de diverses manières, formelles ou informelles. Par exemple, en ce qui concerne le suivi de production, la saisie des données est majoritairement automatisée (code à barres, par exemple) [Mestoudjian et De Crescenzo, 1987]. Pour la collecte des données extérieures, les moyens de communications sont utilisés (Internet, réseaux dédiés, téléphone, courrier postal ou électronique).
- L'activité d'intégration consiste à associer des données collectées. Elle permet donc d'établir les liens entre certains éléments des diverses familles. Par exemple, on peut associer un temps de production à un temps de maintenance, un taux d'usure et à un prix de revient.
- L'activité de réduction, c'est-à-dire la simplification de l'information pour la rendre interprétable et exploitable par le centre de décision. Il peut s'agir d'une sélection, d'un filtrage d'éléments (max, min) ou de toute autre opération arithmétique (somme, moyenne). En exploitation, il peut ainsi être nécessaire d'agréger la représentation des nomenclatures, des tâches de fabrication, des capacités de production, etc. [Farthouat et al, 1997], [Zolghadri et Bourrières, 2000]. Par exemple, il peut être pertinent de définir une « macro » activité comme succession d'activités ou d'opérations élémentaires. Les ressources, quant à elles, peuvent être regroupées par famille ou par lignes de production.
- L'activité d'archivage : Il faut enfin saisir les informations, c'est-à-dire les enregistrer sur divers supports, de manière à pouvoir les conserver, et si besoin est les réutiliser. Ceci nécessite souvent au préalable de définir les modalités de cette saisie (quelle information saisir, de quelle manière, sur quel support etc.).

4.4. Intégration du PTD dans les réseaux 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 [Doumeingts, 1984]. Nous rappelons en quelques mots les concepts manipulés au niveau des réseaux GRAI, pour ensuite y intégrer le PTD.

- les activités : dans les réseaux GRAI, on distingue les activités de décision (nécessitant un choix expert) et d'exécution (procédurales). (Figure 5.11).

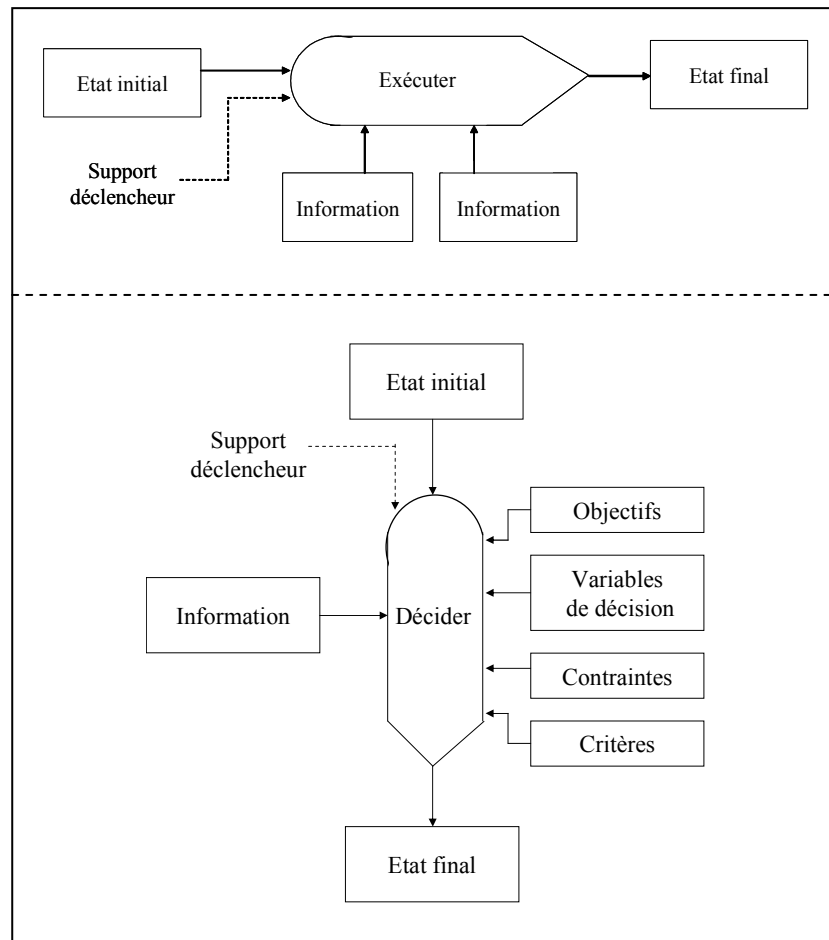


Figure 5.11 – Activités d'exécution et de décision dans les réseaux GRAI

- les supports à la décision: informations, objectifs, variables de décision, contraintes et critères.
- les opérateurs logiques : ils permettent la combinaison de plusieurs supports en entrée ou en sortie des activités et sont de deux types (ET, représenté par une double barre, et OU, représenté par une simple barre).
- les symboles de communication : ils permettent de signaler qu'un support d'informations représenté dans le réseau d'un centre de décision est connecté à autre centre de décision (où il est également représenté). Ces connecteurs sont représentés par un losange et mentionnent le code de l'activité et du réseau destinataire ou origine.

Le PTD s'intègre naturellement dans les réseaux GRAI. Les sorties de celui-ci viennent en effet alimenter les supports d'informations requis par les activités d'exécution et de décision identifiés par un réseau GRAI (Figure 5.12).

L'intégration du PTD au sein des réseaux GRAI est illustré par le cas d'étude traité dans l'annexe 1, pour un centre de décision du niveau exploitation (centre de décision « Plan de Charge, pour la gestion de la production)

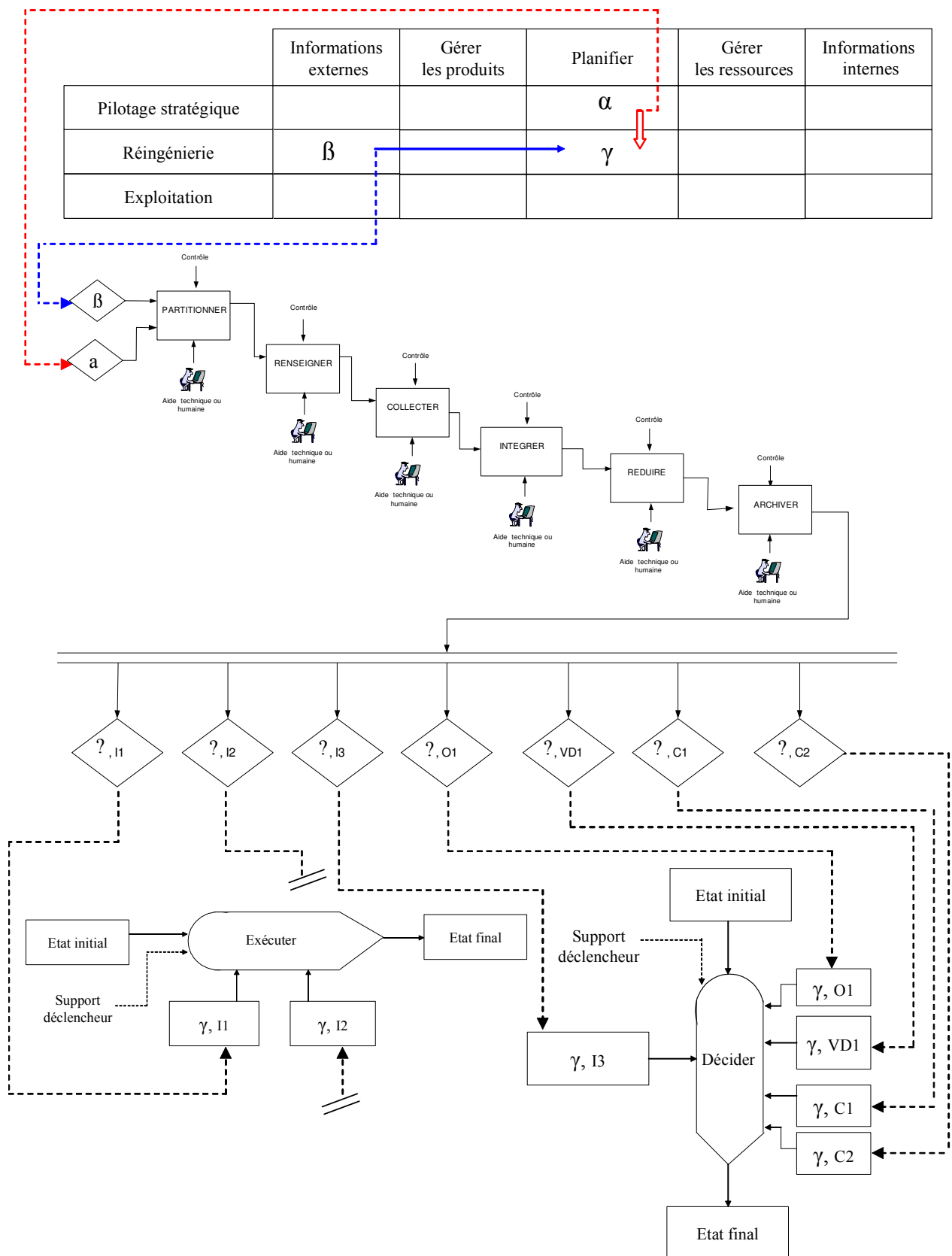


Figure 5.12 – Intégration du PTD dans les formalismes de représentation GRAI

5. CONCLUSION

Ce dernier chapitre s'est attaché à compléter les outils de modélisation de la structure de pilotage de l'entreprise. L'extension du modèle GRAI de conduite pour la représentation unifiée du pilotage opérationnel, de ré-ingénierie et stratégique permet de recenser tous les centres décisionnels d'un système de production, ainsi que les principales informations mises à leur disposition.

Les informations transitant par le système d'informations de l'entreprise sont variées et d'origine diverse. Nous les avons structurées en référence aux niveaux de pilotage qui les utilisent, en faisant la part des sources internes au systèmes (au nombre desquelles figurent les indicateurs de Performances du système) et des sources externes qui alimentent les fonctions de veille. Ces deux sources d'information sont prévues dans le modèle GRAI de conduite.

Cependant, la logistique d'information (routage et transformation des informations) requise demeure implicite dans la modélisation du système de pilotage. Nous avons été amené à l'explicitier et à l'intégrer dans la représentation des flux décisionnels propre au modèle de conduite GRAI. Le Processus de Traitement des Données (PTD explicite la transformation des données « brutes » en informations pertinentes, nécessaires et suffisantes pour la prise de décision. Ce PTD est potentiellement constitué de six activités (partition, renseignement, collecte, intégration, réduction, et archivage), non nécessairement toutes impliquées dans un même cas.

CONCLUSION DE LA PARTIE 2

La deuxième partie de ce mémoire s'est attachée à montrer quel parti tirer de la modélisation multi - vue dans les différents contextes de gestion rencontrés dans le cycle de vie du système. Nous avons considéré le pilotage de l'entreprise selon trois niveaux : un niveau de pilotage stratégique, décidant des projets de ré-ingénierie produit et / ou système à mettre en oeuvre, un niveau de pilotage structurel, guidant le projet de ré-ingénierie, et un niveau de pilotage opérationnel, en charge d'exploiter le système réel. Chaque niveau de pilotage s'appuie sur une vue modèle adaptée aux objectifs. Le pilotage stratégique est ainsi amené à raisonner sur la vue fonctionnelle du système, tandis que le pilotage structurel se base sur la vue organique. Le pilotage opérationnel, amené à conduire le système de production lui-même, s'appuie sur la vue opérationnelle correspondant à la description des processus et modes opératoires d'exploitation du système.

Les indicateurs de performance (IP) sont destinés au pilotage du processus d'évolution des systèmes de production. Différentes classes d'indicateurs de performances ont été identifiées, selon le niveau de pilotage auquel ils s'adressent :

- Les indicateurs pour le pilotage stratégique de l'entreprise. C'est sur la base de ces indicateurs que s'effectue la veille stratégique et que se justifie le lancement de projets de ré-ingénierie ;
- Les indicateurs de performance structurels support à la ré-ingénierie proprement dite, qui permettent la pré - évaluation des différents scénarios d'amélioration ;
- Les indicateurs pour l'exploitation du système, qui permettent d'en détecter les dysfonctionnements eu égard aux fonctionnements nominaux prévus lors de la conception du système.

L'analyse de la criticité de ces indicateurs permet de définir les événements susceptibles de déclencher les décisions correctrices à chacun des trois niveaux de pilotage. Les éventuels dysfonctionnements à corriger peuvent être dus aux évolutions de l'environnement du système ou peuvent trouver origine dans le système lui-même. Aux différents niveaux de pilotage, nous distinguons les IP-Système, issus à partir d'observations du système réel, et les IP-Modèle qui stipulent les performances de référence.

Au niveau de pilotage de la ré-ingénierie, nous avons dressé un parallèle entre la conduite de projets de reconception du système et projets de reconception des produits, qui constituent deux moyens d'actions du pilotage stratégique.

Nous avons proposé une présentation intégrée des trois niveaux de pilotage par une grille GRAI étendue à la gestion de l'évolution d'un système de production, en interprétant les fonctions génériques de conduite de la grille (Gérer les produits, Gérer les Ressources, Planifier) à chacun des niveaux de pilotage.

Enfin, nous avons conclu notre étude par l'analyse et la modélisation de la logistique des informations irriguant les centres de décision du modèle GRAI et les reliant au système d'informations de l'entreprise. Nous avons représenté, à l'aide de réseaux d'activités GRAI, les Processus de Traitement des Données générant le juste niveau d'agrégation de l'information attendu par les centres de décision.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail vise à promouvoir l'usage de la modélisation d'entreprise multi – vue pour le pilotage, du court au long terme, des processus d'exploitation, de reconception et de réorientation stratégique. Dans ce cadre, nous avons cherché à mettre en relation les différents acquis de la modélisation d'entreprise, domaine visant à représenter différents aspects de l'organisation industrielle, des processus de ré-ingénierie ou de l'évaluation de performance, au sein d'une représentation unifiée. Nous avons plus particulièrement utilisé les éléments de modélisation du laboratoire (modèle de conduite GRAI, indicateurs de performance, modélisation des données techniques en planification, modélisation des processus d'ingénierie des produits).

Nous avons concentré en premier lieu nos efforts sur les liens entre les aspects fonctionnel et organique des systèmes de production, qui nous semblent nécessaires pour bien comprendre la justification des solutions d'organisation et leur remise en cause par les projets d'ingénierie qui rythment le cycle de vie de ces systèmes. Dans un second temps, nous avons étudié l'usage de la modélisation dans la gestion de l'entreprise aux différents niveaux de pilotage, de l'exploitation du système de production à la gestion de son évolution.

Les contributions développées dans cette thèse ont en définitive consisté à :

- Fournir un cadre de modélisation explicitant le lien entre les caractéristiques fonctionnelles du système et sa constitution organique et ainsi effectuer une synthèse entre les différentes écoles de pensée de macro - modélisation et de micro - modélisation disponibles dans la littérature scientifique ;
- Produire un référentiel générique permettant de structurer la bibliothèque de modèles archivant les différentes documentations accompagnant les modifications du système au cours de son cycle de vie, et d'asseoir le raisonnement de la gestion de l'évolution basée-modèle.
- Mettre en évidence la dualité de la reconception du système et de la reconception des produits en tant que variables d'action stratégiques ;
- Eclairer l'usage qui peut être fait des modèles pour structurer la démarche d'ingénierie produit / système ;
- Placer l'usage des indicateurs de performance dans la gestion du cycle de vie des systèmes ;
- Unifier les problématiques de pilotage opérationnel (exploitation du système de production), de pilotage structurel (ingénierie système et produit) et de pilotage stratégique (maintien de la fonction économique de l'entreprise dans le marché) en tant que cascade de tâches de pilotage et les intégrer dans un modèle GRAI de conduite étendu ;
- Modéliser le processus d'émergence des informations requises par les centres de décision du système et tenter d'explicitier la *logistique d'information* sous-jacente.

Ce travail s'est donc attaché à fournir une vue d'ensemble des outils de modélisation utilisables pour le pilotage basé-modèle de l'entreprise, en promouvant au final un besoin de modélisation de la logistique d'information. Néanmoins, ce dernier aspect est encore peu développé et ne constitue que les prémisses d'une recherche sur la caractérisation et la

maîtrise des flux informationnels dans les systèmes de production. Sur cette base, une thèse vient de débiter au laboratoire⁴⁸, dont l'objectif est de parvenir à une modélisation des aspects génériques relatifs aux informations utiles au pilotage des chaînes logistiques.

Les perspectives d'une recherche sur la logistique d'information sont multiples. Outre la caractérisation l'information nécessaire à la prise de décision, on peut citer la prise en compte de la dynamique propre du flux d'informations, des indicateurs de performances relatifs à l'organisation et à l'écoulement de ces flux, ou l'étude de l'impact de la dynamique du flux informationnel sur les performances globales du système piloté.

⁴⁸ Thèse de Melle Aicha AMRANI, débutée au LAPS en 2005



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [AFGI, 1992] Association Française de Gestion Industrielle, « Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage », ouvrage collectif AFGI, 1992.
- [AFNOR, 1988] Association Française pour la NORmalisation, « Norme X 50-127, Gestion de la Qualité, Recommandations pour obtenir et assurer la qualité en conception », Paris, 1988.
- [AFNOR, 1990] Association Française pour la NORmalisation, « Norme AFNOR X 50-150, Analyse de la valeur – Analyse fonctionnelle », 1990.
- [AFNOR, 1994] Association Française pour la NORmalisation, « Norme AFNOR ISO 8402, Vocabulaire pour le management et l'assurance de la qualité », 1994.
- [Aléonard et al, 1994] C. Aléonard, E. Dindeleux et R. Soënen, « Conduite des systèmes de production », Techniques de l'ingénieur, A 8 260-R 7 598, 1994.
- [Allagama, 2004] J.F. Allagama, « Amélioration du process de fabrication de l'entreprise Roncadin », Mémoire d'ingénieur, Institut des Sciences et Techniques de Aliments de Bordeaux, Université Bordeaux1, 2004.
- [Alsène et al, 2002] E. Alsène, M. Gamache et M. Lejeune, « Gestion des savoirs et gestion des compétences : une articulation possible, mais limitée », GCC-GI02, 1^{er} Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel : Vers l'articulation entre Compétences et Connaissances, 12-13 décembre 2002, Nantes.
- [AMICE, 1993] Consortium AMICE « CIMOSA : Open Systems Architecture for CIM », 2^{ème} édition, Springer-Verlag, Berlin.
- [Antony, 1965] R. Antony, « Planning and control systems : a framework for analysis », Boston, Harvard University Press, 1965.
- [Axsäter, 1981] S. Axsäter, « Aggregation of product data for hierarchical production planning », Operation research, 29, pp. 754-756, 1981.
- [Badot, 1998] O. Badot, « Théorie de l'entreprise agile », L'harmattan, Paris, 1998.
- [Bareigts, 2000] C. Bareigts, « Importance de la coordination / coopération en terme d'apprentissage organisationnel », Actes du colloque Agents logiciels, coopération, apprentissage & activité humaine, ATIEF, Biarritz, France, 2000.
- [Bartoli et Hermel, 1986] A. Bartoli et P. Hermel, « Piloter l'entreprise en mutation : une approche stratégique du changement », Les Editions d'Organisation, 1996.
- [Bernus et Nemes, 1999] P. Bernus et L. Nemes, « Organisational design : dynamically creating and sustaining integrated virtual enterprise », In H.F. Chen, D.Z. Cheng, J.F. Zhang (Eds), Proc. IFAC World Congress, vol A, Elsevier, Londres, 1999.

- [Berrah, 1997] L. Berrah, « Une approche d'évaluation de la performance industrielle. Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif », Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP, Grenoble, 1997.
- [Berrah, 2002] L. Berrah, « L'indicateur de performance: concepts et applications », Cepadues, 2002.
- [Berrah et al, 2001] L. Berrah, V. Clivillé, M. Harzallah, A. Haurat et F. Vernadat, « PETRA, Un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle », Rapport d'activités 2001 du LGIPM, Université de Metz, 2001.
- [Beving, 1995] J.M Beving, « Généralités sur les systèmes. La modélisation systémique en entreprise », C Braesch and A. Haurat (éd.), Hermès, Paris, 1995.
- [Birdir, 2000] K. Birdir, « Research Chefs' Competencies : A Delphi Approach », International Journal of Contemporary Hospitality Management, vol 12, n°3, pp. 205-209, 2000.
- [Bititci, 2001] U.S. Bititci, « Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems », International Journal of Production Economicsn Vol. 69, pp. 137-147, 2001.
- [Bitton, 1990] M. Bitton, « ECOGRAI: Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles », Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 1990.
- [Bitran et al, 1981] G.R. Bitran, E.A. Haas et A.C. Hax, « Hierarchical production planning : a single stage system », Operations Resarch, 29, pp. 717-743, 1981.
- [Blosiu et Kowalick, 1996] J. Blosiu et J. Kowalick, « TRIZ and business survival », TRIZ Journal, November, 1996.
- [Bonjour et Dulmet, 2002] E. Bonjour et M. Dulmet, « Articulation entre pilotage des systèmes de compétences et gestion des connaissances », GCC-GI02, 1^{er} Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel : Vers l'articulation entre Compétences et Connaissances, 12-13 décembre 2002, Nantes.
- [Bourne et al, 2000] M. Bourne, J.F. Mills, M. Wilcox, A.D. Neely et K.W. Platts, « Designing, implementing and updating performance measurement systems », International Journal of Operations Production Management, Vol. 20 (7), pp. 754-771, 2000.
- [Bourrieres, 1998] J.P. Bourrieres, « Multilevel algebraic modelling of complex manufacturing tasks », Proceedings of the IFAC IMS'98, pp. 261-265, Porto alegre, Nov 9-11, 1998.
- [Bousquet et al, 2002] F. Bousquet, C. Le Page et J.P. Müller, « Modélisation et simulation multi-agent », Actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3, 5-7 Décembre 2002, Nancy.

- [Brinzei et al, 1999] N. Brinzei, G. Draghici, M. Ferney et N. Zerhouni, « Modélisation des systèmes de production par une approche multi-agents », Bulletin scientifique, Université « POLITEHNICA » de Timisoara, département de Mécanique, 1999.
- [Brna, 1998] P. Brna, « Models of Collaboration », Proceedings of the Workshop on Informatics in Education, XVIII Congresso Nacional da Sociedade Brasileira de Computação Rumoa Sociedade do Conhecimento in Belo Horizonte, Brazil, 1998.
- [Browne et al, 1999] J. Browne, J. Devlin, A. Rolstadas et B. Andersen, « Performance Measurement The ENAPS Approach », <http://www.ipk.ntnu.no/Personal/Privat/bjorna/Publications/PDF%20Files/PM%20The%20ENAPS%20Way.pdf>
- [Burlat, 2002] P. Burlat, « Une démarche de configuration de chaîne logistique », Présentation des journées du Groupement de Recherche en Productique, Tarbes, 2002.
- [Camalot, 2000] J.P. Camalot, « Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources », Thèse de doctorat, LAAS, 2000.
- [Campagne et Sénéchal, 2002] J.P. Campagne et O. Sénéchal, « Les nouvelles exigences de la coopération », Groupe PROSPER, 2002.
- [Cantamessa, 1997] M. Cantamessa, « Hierarchical and heterarchical behaviour in agent-based manufacturing systems », Computers in Industry, vol 33, pp. 305-316, 1997.
- [Capul, 1998] Y. Capul, « Des organisations transversales à la coopération dans l'entreprise », dans *Management et organisation des entreprises*, Cahiers Français, V. 287, 1998.
- [Caussanel et Chouraqui, 1999] J. Caussanel et E. Chouraqui, « Informations et connaissances : quelles implications pour les projets de capitalisation de connaissances », Document numérique, vol 3, n° 3-4, pp. 101-119, 1999.
- [Cauvin et al, 2002] A. Cauvin, P. Baillet- Farthouat et Z. Binder, « Structures hiérarchisées des systèmes de pilotage », dans *Fondements du pilotage des systèmes de production*, sous la direction de P. Pujo et J.P. Kieffer, Chapitre 2, Hermes Science publications, Edition Lavoisier, 2002.
- [Chaïb-Draa, 1999] B. Chaïb-Draa, « Agents et systèmes multiagents (IFT 64881A) », Notes de cours, Département Informatique, Faculté des sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Novembre 1999.
- [Chalmeta et Grangel, 2003] R. Chalmeta et R. Grangel, « ARDIN extension for virtual enterprise integration », The Journal of Systems and Software, vol 67, pp. 141-152, 2003.
- [Chaminade, 2005] B. Chaminade, « RH et compétence dans une démarche qualité », Editions AFNOR, 2005.

- [Charpentier et al, 2001] P. Charpentier, F. Chaxel, A. Thomas et E. Muhl, « Quelques approches de pilotage distribué et leur formalisation », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol 35, n° 7-8, 2001, pp. 885-904, 2001.
- [Christensen, 1994] J. Christensen, « HMS Initial Architecture », in the First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover, Germany, December, 1994.
- [Clark and Wheelwright, 1992] K.B. Clark and S.C. Wheelwright, « Revolutionizing Product Development, Quantum Leaps in Speed, Efficiency and Quality », The Free Press, New York, 1992.
- [Clivillé, 2004] V. Clivillé, « Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance », Thèse de doctorat, Université de Savoie, Septembre 2004.
- [Cohendet et Llerena, 1999] P. Cohendet et P. Llerena, « Flexibilité et modes d'organisation », *Revue Française de Gestion*, 1999.
- [Collaine, 2001] A. Collaine, « Une méthode d'évaluation de l'impact des évolutions du produit sur le système de production et la performance de l'entreprise », Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2001.
- [Collaine et Gartiser, 2001] A. Collaine et N. Gartiser, « Programme Système de Production – PROSPER, Projet RÉSYPROQ Reconception Évolution SYstème de PROduction Qualitatif », Juin 1998 – Juin 2001, Rapport scientifique final, 2001.
- [Côté, 1999] M. Côté, « Une architecture multi- agent et son application aux services financiers », Mémoire présenté à la Faculté des Etudes Supérieures de l'Université de Laval, Faculté des sciences et de génie, département informatique, Avril 1999.
- [Coudert, 2000] T. Coudert, « Apport des systèmes multi- agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2000.
- [Courtois et al, 1995] A. Courtois, C. Martin – Bonnefous et M. Pillet, « Gestion de production », Paris, Les éditions de l'organisation, Collection EO SUP, 3^{ème} édition, 4, 11-12, 95-120, 305-317, 319-351.
- [CPC, 1997] Club Production et Compétitivité, coordination P.M. Gallois, « De la Pierre à la Cathédrale : les Indicateurs de Performance », Ministère de l'Industrie de la Poste et des Télécommunications, Editions Londez Conseil, 1997.
- [Croom et al, 2000] S. Croom, P. Romano et M. Giannakis, « Supply chain management : an analytical framework for critical literature review », *European Journal of Purchasing and Supply Management*, n°6, pp. 67-83, 2000.
- [Curtis, 1989] G. Curtis, « Business Information Systems : Analysis, Design and Practice », Addison-Wesley, Wokingham, 1989.

- [Czarnecki and Helsen, 2003] K. Czarnecki and S. Helsen, « Classification of Model Transformation Approaches », OOPSLA'03 Workshop on Generative Techniques in the Context of Model-Driven Architecture, Anaheim Convention Center, Anaheim, California, USA, October 27, 2003.
- [David and Allah, 1989] R. David and H. Allah, « Du grafctet au réseau de Petri », Editions Hermès, 1989.
- [Davidow et Malone, 1997] W. Davidow, M. Malone, « L'entreprise à l'âge du virtuel », Editions Maxima, Paris, 1997.
- [De la Bretesche, 2000] B. De la Bretesche, « La méthode APTE : Analyse de la valeur et analyse fonctionnelle », Editions Petrelle, 2000.
- [Deming, 1982] E.W. Deming, « Quality, Productivity and Competitive Position », The MIT Press, 1982.
- [Dempster et al., 1981] M. Dempster, A. H. Fisher, M.L. Lageweg, B. Jsen, L. Lenstra, J.K & Rinnoy Kan, A.H.G., « Analytical evaluation of hierarchical planning systems », Operations Research, 1981, n°29, pp. 707-716.
- [Denis et Lesage, 1995] B. Denis et J.J. Lesage, « Un panorama de la recherche en conception de la conduite des systèmes de production », Actes du congrès international de génie industriel de Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal, pp. 1537-1549, Montréal, Quebec, Canada, 7-9 Octobre 1995.
- [De Rosnay, 1975] J. De Rosnay, « Le microscope : vers une version globale », Editions du Seuil, 1975.
- [Deschamps et al, 2004] J.C. Deschamps, M. Roque et B. Vallespir, « Modélisation de processus par réseaux de transformateurs : définition et propriétés », 5ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'04, Nantes.
- [Dillenbourg et al, 1996] P. Dillenbourg, M. Baker, C. Blaye et O'Malley, « L'évolution de la recherche sur l'apprentissage collaboratif », dans E. Spada & P. Reiman (Eds), Learning in Humans and Machine : Towards an interdisciplinary learning science, pp. 189-211.
- [Dilts et al, 1991] D.M. Dilts, N.P. Boyd et H.H. Whorms, « The evolution of control architectures for automated manufacturing systems », Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, n° 1, pp. 79- 93, 1991.
- [Di Mascolo et al, 2000] M. Di Mascolo, C. Duri et Y. Frein, « Comparison between three Pull Control Policies : Kanban, Base Stock, and Generalized Kanban », Annals of Operations Research, Vol. 93, pp. 41-69, 2000.
- [Dombre et Khalil, 1989] E. Dombre et 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 en productique », Thèse d'état, Automatique, Université Bordeaux 1, 1984.
- [Doumeingts et al, 1983] G. Doumeingts, D. Breuil et L. Pun, « La gestion de production assistée par ordinateur », Paris, Hermes Publishing, 1983.
- [Doumeingts et al, 1993] G. Doumeingts, D. Chen, B. Vallespir et P. Fénéié, « GIM (GRAI integrated methodology) and its evolutions a methodology to design and specify advanced manufacturing systems », IFIP Transactions B : Computer Applications in Technology, Issue B-14, Pages 101-117, 1993.
- [Doumeingts et al, 1996] G. Doumeingts, S. Kleinhans et N. Malhéné, « GEM TIME : a proposal for an evolution management methodology », APMS'96, Kyoto, 4-6 novembre 1996.
- [Doumeingts et al, 1998] G. Doumeingts, B. Vallespir et D. Chen, « GRAI Grid Decisional Modelling », In Handbook on Architecture of Information Systems, Edited by P. Bernus, K. Mertins, G. Schmith, International Handbook on Information Systems, Springer Verlag, pp. 313-337, 1998.
- [Doumeingts et Ducq, 2000] G. Doumeingts et Y. Ducq, « G.I.M (Grai Integrated Method) », GRAISOFT – LAP / GRAI, Version 3, Octobre 2003.
- [Doumeingts et Vallespir, 1994] G. Doumeingts et B. Vallespir, « Gestion de production : principes », Collection Techniques de l'ingénieur, 1994.
- [Drira, 2005] K. Drira, « Contribution à la conception des architectures logicielles et des protocoles de coordination pour les systèmes distribués coopératifs », Rapport LAAS No05254, 2005.
- [Ducq et Gentil, 2003] Y. Ducq et M.H. Gentil, « Conception et implantation de systèmes d'indicateurs de performance », Chapitre 7, pp. 143-175, dans l'ouvrage collectif Evaluation des performances des systèmes de production, coordonné par C. Tahon, Editions Hermès, 2003.
- [Duffie et Prabhu, 1996] N.A. Duffie et V. Prabhu, « Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems », International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol 9, n° 4, pp. 270-281, 1996.
- [El Mhamedi et al, 1997a] A. El Mhamedi, Ch. Lerch, S. Marier, M. Sonntag et F. Vernadat, « Intégration des Activités Non Structurées dans la Modélisation des Systèmes de Production », Rapport final du projet ACNOS. D.S.P.T.8., ENSAIS, Strasbourg, 18 février 1997.
- [El Mhamedi et al, 1997b] A. El Mhamedi, C. Lerch et M. Sonntag, « Apport du mode de représentation ACNOS dans la rédaction des procédures de qualité », Deuxième Congrès International Franco- Québécois de Génie Industriel, Albi, 1997.

- [El Mhamedi, 2002] A. El Mhamedi, « La méthode CIMOSA », Ecole de Printemps de Modélisation d'Entreprise : une réflexion sur l'enseignement et la pratique des méthodes, Albi- Carmaux, 28-30 Mai 2002.
- [Farthouat et al, 1997] P. Farthouat, F. Pereyrol, D. Chen et J.P. Bourrières, « Modélisation multi- niveaux des systèmes de production distribués et agrégation des données techniques de gestion de production », 2^{ème} congrès de génie industriel, Albi, 3-5 Septembre, 1997.
- [Faucher, 2004] J. Faucher, « Pratique de l'AMDEC : Assurez la qualité et la sûreté de fonctionnement de vos produits, équipements et procédés », Edition Dunod – L'usine Nouvelle, collection Fonctions de l'entreprise, ISBN 2100067109, Janvier 2004.
- [Fénié, 1994] P. Fénié, « GRAICO : méthode de modélisation et de conception des systèmes d'exploitation de systèmes de production », Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 1994.
- [Ferber, 1995] J. Ferber, « Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective », Intereditions, 1995.
- [Fontan et al, 1995] G. Fontan, G. Hétreux et C. Mercé, « Multi - Stage, Multi - Product Planning : A hierarchical approach using tume aggregation », International Conference on Engineering and Production Management, Marrakech, 1995.
- [Fortuin, 1988] L. Fortuin, « Performance indicators – why, where and how ? », European Journal of Operational Research, Vol. 34, pp. 1-9, 1988.
- [Franchini et al, 1997] L. Franchini, E. Caillaud et G. Lacoste, « Conduite des systèmes industriels de type PME / PMI : problématique, état de l'art et pistes de recherche », 2ème Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel, Albi, France, 3-5 septembre 1997.
- [Freitas, 1999] M. Freitas, « Dossier spécial Supply Chain Management : Optimisons les transports », CXP Informations, n° 255, pp. 58, 59, 1999.
- [Gallois, 1990] P.M. Gallois, « Evaluer pour évoluer : Pilotage et évaluation de la performance industrielle », Commission Indicateurs de performance, Paris, AFGI, 1990.
- [Gardoni, 1999] M. Gardoni, « Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée. Cas d'étude Aérospatiale », Thèse de l'Université de Metz, 1999.
- [Garibaldi, 2001] G. Garibaldi, « L'analyse stratégique, comment concevoir les choix stratégiques en situation concurrentielle, Editions d'Organisation, 2001.
- [Gautier et Giard, 2000], F. Gautier et V. Giard, « Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux », papier de recherche du GREGOR (<http://panoramix.univ-paris1.fr/GREGOR/>), Janvier 2000.

- [Gershwin, 1987] S.B. Gershwin, « A hierarchical framework for discrete event scheduling in manufacturing systems », in IIASA, workshop on discrete event systems: models and applications, Sopron, Hongrie, 1987.
- [Ghalayini et al, 1997] A.M. Ghalayini, J.S. Noble and T.J. Crowe, « An integrated dynamic performance measurement system for improving manufacturing competitiveness », International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15, pp. 80-116, 1997.
- [Giard, 1988] V. Giard, « Gestion de la production », Editions Economica, 1988.
- [Girard, 1999] P. Girard, « Etude de la conduite de la conception des produits manufacturés : contribution à l'ingénierie des systèmes de conception », Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, Février 1999.
- [Girard and Doumeingts, 1994] P. Girard and G. Doumeingts, « Design Management of Mechanical Product », IFIP TC5 WG5.3, International Conference on Feature Modeling & Recognition in Advanced CAD/CAM Systems, Edited by Hermes, pp. 109-123, Valenciennes, France, 24-26 mai 1994.
- [Girard and Doumeingts, 2004] P. Girard and G. Doumeingts, « Modelling the engineering design system to improve performance », Computers & Industrial Engineering, 46, pp. 43-67, 2004.
- [Girard et al, 1998] P. Girard, B. Eynard et G. Doumeingts, « Proposal to control the systems design process : application to manufactured products », International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Primeca, Cirp, Compiègne, France, May 27-29, 1998.
- [Godet, 1991] M. Godet, « Les dangers de la (seule) réactivité », Revue Française de Gestion, n° 86, nov. - déc. 1991.
- [GOThA, 1993] Groupe de recherche en Ordonnancement Théorique et Appliqué, « Les problèmes d'ordonnancement », Recherche opérationnelle, vol 27, n°1, pp. 77-150, 1993.
- [GDT, 2004] Grand Dictionnaire Terminologique, Office québécois de la langue française, <http://granddictionnaire.com>
- [Grouard et Meston, 1993] B. Grouard et F. Meston, « L'entreprise en mouvement », Dunod, Paris, 1993.
- [GRP, 1999] Groupe de travail n°5 du Groupement pour la Recherche en Productique, « La modélisation d'Entreprise : le point de vue productique », Version 1.1, Mai 1999.
- [Grundstein, 2002] M. Grundstein, « De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue », conférencier invité, GCC-GI02, 1^{er} Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel : Vers l'articulation entre Compétences et Connaissances, 12-13 décembre 2002, Nantes.

- [Gueguen, 1997] G. Gueguen, « Face aux turbulences, l'entreprise doit-elle être réactive ? Propos de réflexion », Communication pour la VIème Conférence Internationale de Management Stratégique, Montréal, du 25 au 27 Juin 1997.
- [Hammer et Champy, 1996] M. Hammer et J. Champy, « Le re-engineering », Editions Dunod, 1996.
- [Hax and Meal, 1975] A.C. Hax and 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 et al, 1995] G. Hétreux, G. Fontan et C. Mercé, « Etude de processus décisionnels en planification hiérarchisée », Rapport LAAS 95420, Octobre 1995.
- [Hirsch et al, 1996] B.E. Hirsch, T. Kuhlmann, C. Massow, R. Oehlmann et K.D. Thoben, « A conceptual system support framework for distributed product development and manufacturing », in Life cycle modelling for innovative products and process (Berlin, Novembre / Décembre 1995), H. Jansen et F-L Kraüse (eds), Chapman&Hall, ISBN 0-412-75590-4, pp. 553-564, London, 1996.
- [Huhns, 1987] M.N. Huhns, « Distributed Artificial Intelligence », research notes in Artificial Intelligence, vol 1, Ed. Pitman, Londres, 1987.
- [ICAM, 1981] Integrated Computer Aided Manufacturing, « Architecture Part II, vol. IV – Functional Modelling Manual (IDEF0) », Air Force Material Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio 45433, AFWAL-TR-81-4023, 1981.
- [Imai, 1989] M. Imai, « Kaizen. La clé de la compétitivité japonaise », Eyrolles, Paris, 1989.
- [Jacob, 1996] G. Jacob, « Le reengineering de l'entreprise », éditions Hermès, Série Informatique et organisation, 1996.
- [Jagdev and Browne, 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.
- [Javel, 2000] G. Javel, « Organisation et gestion de la production », Editions Dunod, 2^{ème} édition, Paris, 2000.
- [Kaisergruber, 1999] D. Kaisergruber, « Les transformations du travail et de l'emploi dans l'entreprise aujourd'hui », Economie et société, Des alternatives pour l'emploi, Rhône-Alpes, Décembre 1999.
- [Kaplan et Norton, 1998] R.S. Kaplan et D.P. Norton, « Le tableau de bord prospectif. Pilotage stratégique : les 4 axes du succès », Editions d'Organisation, 1998.
- [Kearney, 1994] A.T. Kearney, « Management approach to Supply Chain Integration », Rapport aux membres de l'équipe de recherche, A.T. Kearney, Chicago, 1994.

- [Kermad et al, 2001] L. Kermad, M. Lamolle, E. Dafaoui, A. El Mhamedi et C. Pourcel, « Comparaison des méthodes de modélisation en entreprise ACNOS et MECI », 4^{ème} congrès international de génie industriel, pp. 523-533, Aix-en-Provence / Marseille, France, Juin 2001.
- [Koestler, 1971] A. Koestler, « The Ghost in the Machine », ISBN O-14-O19192-5, 1971.
- [Kueng et al, 2001] P. Kueng, A. Meier, T. Wettstein, « Performance Measurement Systems must be engineered », Communication of the Association for Information Systems, Vol. 7 (3), pp. 1-17, 2001.
- [Landy, 2002] G. Landy, « AMDEC: Guide pratique », Edition Afnor, ISBN 2124750550, Décembre 2002.
- [Lasnier, 2000] F. Lasnier, « Réussir la formation par compétences », Guérin, Montréal.
- [Lauras et al, 2003] M. Lauras, N. Parrod, O. Telle, J. Lamothe et C. Thierry, « Référentiel de l'entente industrielle : trois approches dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques », 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel : Le Génie industriel et les nouveaux défis mondiaux, 26-29 Octobre 2003, Québec, Canada.
- [Lecompte, 2001] T. Lecompte, « Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production réticulaires », Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, Décembre 2001.
- [Legardeur et al., 2003] J. Legardeur, C. Merlo, I. Franchistéguy et C. Bareigts, « Coordination et coopération dans les processus de conception », Actes du 8^{ème} colloque AIP Primeca, Pour le monde industriel actuel : la maîtrise des systèmes complexes, La plagne, du 31 mars au 02 avril 2003.
- [Lemoigne, 1977] J.L. Lemoigne, « La théorie du système général », Editions Presses Universitaires de France, 1977.
- [Lemoigne, 1990] J.L. Lemoigne, « La modélisation des systèmes complexes », Paris, Editions Dunod, 1990.
- [Lemoigne, 1994] J.L. Lemoigne, « La théorie du système général - théorie de la modélisation », Editions Presses Universitaires de France, 1^{ère} éd. 1977, 4^{ème} éd. 1994.
- [Lemoigne, 1995] J.L. Lemoigne, « Les épistémologies constructivistes », Presses Universitaires de France, Paris, 1995.
- [Lesca, 1994] H. Lesca, « Veille Stratégique », Editions Aster, Lyon, 1994.
- [Léveillé, 2000] V. Léveillé, « De l'organisation des données hétérogènes dans les systèmes d'information. Réalisation d'un outil de gestion des données hétérogènes et formelles appliqué à la veille technologique », Thèse de doctorat, Université Aix - Marseille III, Janvier 2000.
- [Livian, 1998] Y.F. Livian, « Organisation : Théories et Pratiques », Editions Dunod, 1998.

- [Malhéné, 2000] N. Malhéné, « Gestion du processus d'évolution des systèmes industriels. Conduite et méthode », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2000.
- [Marcotte, 1995] F. Marcotte, « Contribution à la modélisation des systèmes de production : extensions du modèle GRAI », Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 1995.
- [Mather, 1988] H. Mather, « Competitive Manufacturing », Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice Hall, 1988.
- [Mayer et al, 1992] R.J. Mayer, T.P. Cullinane, P.S. deWitte, W.B. Knappenberger, B. Perakath et M.S. Wells, « Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method », Rapport AL-TR-1992-0057, Air Force Systems Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433, 1992.
- [McFarlane and Bussmann, 2000] D. C. McFarlane and S. Bussmann, « Developments in Holonic Production Planning and Control », International Journal of Production Planning and Control, vol 11, n° 6, pp. 522-536, 2000.
- [Megartsi et Cauvin, 2001] R. Megartsi et A. Cauvin, « Proposition d'un support de conduite des processus d'entreprise dans un contexte distribué », 4^{ème} Congrès International de génie industriel : l'innovation et le développement durable dans la production de biens et de services, Aix-en-Provence / Marseille, Juin 2001.
- [Mehra et al, 1996] A. Mehra, I. Minis et J.M. Proth, « Hierarchical production planning for complex manufacturing systems », in Advances in Engineering Software, n°26, pp. 209-218, 1996.
- [Mélèse, 1972] J. Mélèse, « L'analyse modulaire des systèmes de gestion : une méthode efficace pour appliquer la théorie des systèmes au management », Editions Hommes et techniques, Paris. 1972.
- [Mélèse, 1979] J. Mélèse, « Approche systémique des organisations », Editions Hommes et techniques, Paris. 1979.
- [Mélèse, 1991] J. Mélèse, « L'analyse modulaire des systèmes AMS », Editions d'Organisation, 1991.
- [Mélèse, 1992] J. Mélèse, « Approches systémiques des organisations, vers l'entreprise à complexité humaine », Paris, les Editions d'Organisation, 1992.
- [Mentzer et al, 2001] J.T. Mentzer, W. Dewitt, J.S. Keebler, S. Min, N.W. Nix, C.D. Smith et Z.G. Zacharia, Journal of business logistics Management, vol 22 n°2, 2001.
- [Mercé, 1987] C. Mercé, « Cohérence des décisions en planification hiérarchisée », Thèse d'état de l'Université P. Sabatier de Toulouse, Juillet 1987.
- [Mesarovic et al, 1980] M.D. Mesarovic, D. Macko et Y. Takahara, « Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples », Economica, Paris, 1980.

- [Mestoudjian et De Crescenzo, 1987] J. Mestoudjian et J De Crescenzo, « La gestion de production assistée par ordinateur », tome II, Editions de l'usine nouvelle, 1987.
- [Meyer and Lehnerd, 1997] M.H. Meyer and A.P. Lehnerd, « The power of Product platforms, Building Value and Cost Leadership », The Free Press, New York, 1997.
- [Mintzberg, 1994] H. Mintzberg, « Structure et dynamique des organisations », Les Editions d'organisation, Paris, 1994.
- [Mintzberg and Quinn, 1996] H. Mintzberg and J.B. Quinn, « The Strategy Process: Concepts, Contexts, Cases », Prentice Hall, 1996.
- [Mittmann, 1994] R. Mittmann, « The HMS Test Case », in the First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover, Germany, 1 December 1994.
- [Monteiro, 2001] T. Monteiro, « Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises, le cas de la relation donneurs-d'ordres – fournisseurs », Thèse de doctorat, INP, Grenoble, 2001.
- [Neubert, 1997] G. Neubert, « Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas », Thèse de doctorat en Sciences, INSA de Lyon, 1997.
- [O'Brien, 1995] J. O'Brien, « Les systèmes d'information de gestion », Montréal, Edition du renouveau pédagogique, 1995.
- [Okongwu, 1990] U. Okongwu, « Contribution à la formalisation du concept de flexibilité des systèmes industriels », Thèse de l'Université de Nantes, 1994.
- [Omri, 2003] H. Omri, « Démarche de réorganisation du processus de gestion des modifications », DEA Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2003.
- [Orlicky, 1975] Orlicky, « Material Requirement Planning », Editions Mc Graw – Hill, 1975.
- [Paris et al, 2003] J.L. Paris, C. Caux et H. Pierreval, « Les approches évolutionnistes », dans Evaluation des performances des systèmes de production, sous la direction de C. Tahon, Chapitre 12, Hermes Science publications, Editions Lavoisier, 2003.
- [Poirier et Reiter, 2001] C. Poirier et S.E. Reiter, « La supply chain », Dunod, 2001.
- [Porter, 1986] M. Porter, « L'avantage concurrentiel », InterEditions, Paris, 1986.
- [Portmann et al, 1998] M.C. Portmann, A. Vignier, D. Dardilhac et D. Dezalay, « Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flowshops », European Journal of Operational Research, Volume 107, Issue 2, pp. 389-400, Juin 1998.
- [Pourcel, 1994] C. Pourcel, « La méthode AICOSCOP : principe, méthode pratique », HdR, Université de Tours, 1994.

- [Pourcel et Gourc, 2002] C. Pourcel et D. Gourc, « Présentation de la méthode MECI », Ecole de Printemps de Modélisation d'Entreprise : une réflexion sur l'enseignement et la pratique des méthodes, Albi- Carmaux, 28-30 Mai 2002.
- [Pujo et al, 1999] P. Pujo, N. Broissin, S. Meyer et J.C. Bertrand, « Pilotage décentralisé des systèmes de production », congrès GI, Montréal, pp. 1975-1981, 1999.
- [Pujo et Kieffer, 2002] P. Pujo et J.P. Kieffer, « Concepts fondamentaux du pilotage des systèmes de production », Fondements du pilotage des systèmes de production, sous la direction de P. Pujo et J.P. Kieffer, Hermès Science Publications, Paris, 2002.
- [Pun, 1977] L. Pun, « Approche méthodologique de la modélisation en vue de la maîtrise assistée de la production », Congrès de l'AFCEC sur la modélisation et la maîtrise des systèmes techniques économiques et sociaux, tome 2, Editions Hommes et Techniques, Versailles, Novembre 1977.
- [Quibel, 1996] J. Quibel, « Prévision des ventes », Techniques de l'ingénieur, dossier A 4076, Février 1996.
- [Rashid et al, 2005] A. Rashid, A. Moreira, J. Araujo, P. Sawyer et A. Sampaio, « A Multi-Dimensional, Model-Driven Approach to Concern Identification and Traceability », Workshop on Models and Aspects - Handling Crosscutting Concerns in MDS held with ECOOP 2005, 19th European Conference on Object-Oriented Programming, Glasgow 25–29 July 2005.
- [Rivière et al, 2002] A. Rivière, M Tollenaere, C. Dacunha, « Performances en Engineering Changes Management », IDMME 2002, Clermont – Ferrand, France, 2002.
- [Roboam, 1993] M. Roboam, « La méthode GRAI : principes, outils, démarche et pratique », Edition Teknea, 1993.
- [Roque et al, 2004] M. Roque, B. Vallespir et G. Doumeingts, « Modélisation d'entreprise: traduction et Métamodélisation », 5e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'04 – du 1er au 3 septembre 2004 – Nantes.
- [Ross, 1977] D. T. Ross, « Structured Analysis (SA) : a language for communicating ideas », IEEE Trans. On Software Engineering, vol SE-3, n° 1, 1977.
- [Rouibah and Ould-ali, 2002] K. Rouibah and S. Ould-ali, « PUZZLE : a concept and prototype for linking business intelligence to business strategy », Journal of Strategic Information System, 11(2), pp. 133-152, 2002.
- [Sadfi, 2002] C. Sadfi, « Problèmes d'ordonnancement avec minimisation des encours », Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP, Grenoble, 2002.
- [Sallez et al, 2004] Y. Sallez, D. Trentesaux, T. Berger et C. Tahon, « Product-based and resource-based heterarchical approaches for dynamic FMS scheduling », Computers and Industrial Engineering , vol 46, pp. 611-623, 2004.

- [Sardas et al, 2002] J.C. Sardas, J. Erschler et G. de Terssac, « Coopération et organisation de l'action collective », Groupe PROSPER, 2002.
- [Simon, 1977] H. Simon, « The new science of management decision », Prentice – Hall, 1977.
- [Spérandio et al, 2003] S. Spérandio, F. Pereyrol et J.P. Bourrières, « Un modèle de référence intégrant les vues fonctionnelle et organique des systèmes de production pour l'analyse du système de pilotage », 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel : Le Génie industriel et les nouveaux défis mondiaux, 26-29 Octobre 2003, Québec, Canada.
- [Spérandio et al, 2004a] S. Spérandio, F. Pereyrol et J.P. Bourrières, « Production System Life-Cycle modeling for Control assessment », IEEE SMC 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, October 10-13 2004.
- [Spérandio et al, 2004b] S. Spérandio, F. Peryreol, J.P. Bourrières, « Intégration of a Management Information System in GRAI decisional modeling », Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2004), Santiago, Chili, November 3-5 2004.
- [Spur et al, 1996] G. Spur, K. Mertins et R. Jochem, « Integrated Enterprise Modelling », Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [Suda, 1989] H. Suda, « Future Factory System Formulated in Japan », TECHNO JAPAN vol 22, n°10, pp. 15-25, October 1989, and vol 23, n°3, pp. 51-61, March 1990.
- [Tan, 2001] K.C. Tan, « A framework of supply chain management literature », European Journal of Purchasing and Supply Management, n°7, pp. 39-48, 2001.
- [Tayur et al, 1999] S. Tayur, R. Ganeshan et M. Magazine, « Quantitative models for supply chain management », Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Telle, 2003] O. Telle, « Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : Aide à la coopération au sein d'une relation donneur d'ordres / fournisseurs », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Janvier 2003.
- [Thierry, 2003] C. Thierry, « Gestion de chaînes logistiques : modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme », Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Toulouse II Le Mirail, Juin 2003.
- [Thom, 1972] R. Thom, « Stabilité structurelle et morphogenèse (essai d'une théorie générale des modèles) », Paris, diffuseur en France : Ediscience, reading Mass. : W.A. Benjamin Inc., 1972.
- [Tournesol, 2001] E. Caillaud, H. Fargier, V. Galvagnon, B. Grabot, J. Lamothe, P. Lopez, C. Thierry et T. Vidal, « Réactivité en entreprise : une enquête », Rapport LAAS n° 01387, Juillet 2001.

- [Trentesaux, 2002] D. Trentesaux, « Pilotage hétéroarchique des systèmes de production », Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002.
- [Vacher, 2000] J.P. Vacher, « Utilisation des algorithmes génétiques pour l'optimisation d'un Gantt selon un modèle multi-agent », Thèse de doctorat de l'Université du Havre, Juillet 2000.
- [Vautier, 2001] J.F. Vautier, « Systèmes complexes : Présentation générale », Techniques de l'ingénieur, traité L'entreprise industrielle, AG 1500, 2001.
- [Vergnaud et Harzallah, 2002] N. Vergnaud et M. Harzallah, « CKIM : Modèle de gestion intégrée des compétences et des connaissances », GCC-GI02, 1^{er} Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel : Vers l'articulation entre Compétences et Connaissances, 12-13 décembre 2002, Nantes.
- [Vernadat, 1996] F.B. Vernadat, « Enterprise Modeling and Integration : Principles and Applications », Chapman and Hall, London, 1996.
- [Vernadat, 1999] F.B. Vernadat, « Techniques de Modélisation en Entreprise : Applications aux Processus Opérationnels », Editions Economica, Paris, 1999.
- [Williams, 1992] T.J. Williams, « The Purdue Enterprise Reference Architecture », Instrument Society of America, Research triangle Park, NC, 1992.
- [Williams and Li, 1995] T.J. Williams and H. Li, « A specification and statement of requirements for GERAM », Report n°159, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, West Lafayette, USA, Septembre 1995.
- [Wisner and Fawcett, 1991] J.D. Wisner and S.E. Fawcett, « Link firm strategy to operating decisions through performance measurement », Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, pp. 5-11, 1991.
- [Wooldridge and Jennings, 2000] M. Wooldridge and N.R. Jennings, « Agent- oriented Software Engineering », in Handbook of Technology (Ed. J. Bradshaw), AAAI/ MIT Press, 2000.
- [Zolghadri, 1998] M. Zolghadri, « Contribution à la modélisation agrégée des systèmes de production discrète », Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1998.
- [Zolghadri et Bourrières, 2000] M. Zolghadri et J.P. Bourrières, « Un cadre formel pour la conception d'un système de tableaux de bord en production : application à l'évaluation du taux de disponibilité d'une ressource agrégée », CIFA 2000, Ecole centrale de Lille, 5-8 Juillet 2000.
- [Zolghadri et Bourrières, 2003] M. Zolghadri et J.P. Bourrières, « Data aggregation in Production management systems : from monodimensional to bi-dimensional aggregators », 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, July 27-30 2003.

[Zwingelstein, 1996] G. Zwingelstein, « La maintenance basée sur la fiabilité – guide pratique d’application de la RCM, diagnostic et maintenance », Ed. Hermès, Paris, 1996.



Annexe

1

ANNEXE 1 : CAS D'ETUDE INDUSTRIEL

Sommaire Annexe 1 :
Cas d'étude industriel

1. AVANT - PROPOS	196
2. PRESENTATION DU CAS	196
3. MULTI-MODELISATION	198
3.1. Modélisation fonctionnelle (Modèle GRAI)	198
3.2. Modélisation organique par centres de conduite	199
3.3. Intégration des modèles fonctionnel et organique dans le référentiel tridimensionnel	201
4. MECANISMES D'AGREGATION	202
4.1 Projection suivant l'axe des espaces : instanciation du modèle fonctionnel	202
4.2 Projection suivant l'axe des fonctions : instanciation du modèle organique	203
5. GESTION DES EVENEMENTS ET ANALYSE DE CRITICITE	207
5.1 Analyse de criticité des événements de faible amplitude	207
5.2 Analyse de criticité des événements d'amplitude moyenne	209
6. ETUDE DU PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES	210

1. AVANT - PROPOS

Afin d'illustrer les alternatives de modélisation présentées dans cette thèse, nous considérons ici un cas industriel. En premier lieu, nous montrerons comment modéliser son système de pilotage par une approche à dominante fonctionnelle (modèle GRAI), puis par une approche à dominante organique (centres de conduite), pour enfin articuler ces modèles dans le référentiel tridimensionnel (espace, temps, fonction) (chapitre 3, § 3.3). Nous insisterons ensuite sur les mécanismes d'agrégation au sein de ce référentiel tridimensionnel, qui permettent de reconstruire les vues fonctionnelle et organique du système (chapitre 3, § 3.4 et 3.5). Nous effectuerons une analyse de la criticité d'événements de faible et moyenne amplitudes (chapitre 4, § 4.2 et § 4.3), et terminerons ce cas d'étude par l'application du Processus de Traitement des Données (chapitre 5, § 4) sur un centre de décision de la grille GRAI appliquée à la gestion de production (exploitation du système).

Nous tenons ici à préciser que certaines libertés ont été prises par rapport au système industriel original, dans le but de simplifier l'étude et faciliter la compréhension du lecteur.

2. PRESENTATION DU CAS

L'entreprise étudiée produit des crèmes glacées, des glaces et des sorbets (Figure A2.1). Les produits fabriqués se répartissent en 3 grandes catégories :

- Le vrac : 1L, 2,5L et 5L, qui représente 21% des quantités fabriquées et 20% du chiffre d'affaires ;
- Les spécialités individuelles (gobelets, spaghettis et coupes), qui représentent 10% des quantités fabriquées et 9% du chiffre d'affaires ;
- Les produits dits « de détente », composés de 2 gammes :
 - les bâtonnets et les sucettes (sorbets), qui représentent 23% des quantités fabriquées et 21% du chiffre d'affaires ;
 - les cônes, qui représentent 46% des quantités fabriquées et 42% du chiffre d'affaires.

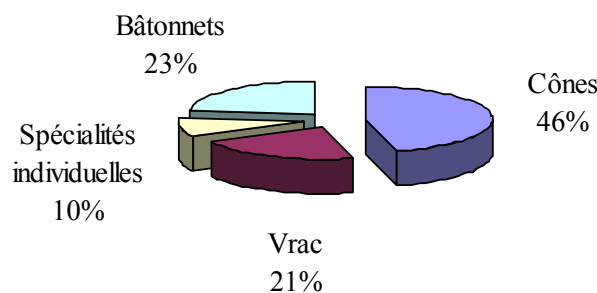


Figure A2.1 – Répartition des volumes de production

Le pôle industriel regroupe l'ensemble des services intervenant directement dans l'activité de production. Celle-ci se décompose en différents secteurs.

- Le secteur de fabrication du « Mix » (S_1) : la fabrication dans une usine de crème glacée commence par l'élaboration du « mix », qui consiste en un mélange de matières premières liquides telles que lait, crème, lait concentré, eau, etc., et de matières solides telles que émulsifiants / stabilisants, cacao en poudre, sucre solide, lait en poudre, etc. De plus, ce secteur gère le recyclage de la glace ne pouvant être utilisée en l'état.

- Le secteur de production / transformation (S_2) : c'est la zone où le mix est transformé en crème glacée, puis moulé et emballé. Ce secteur comprend l'ensemble des lignes de production. Celles-ci sont au nombre de 8 et elles sont regroupées en 3 unités technologiques (l'unité Cônes, l'unité Bâtonnets, et l'unité Vrac / gobelets / spaghettis / spécialités). Elles fonctionnent en 3x8 de janvier à fin septembre.

L'unité Cônes (S_{21}) dispose de deux lignes de fabrication pour produire des cônes (S_{211}) ainsi que des coupes (S_{212}). Les cônes de 70 et 110 ml sont fabriqués sur la « Straight Line » (SL) avec une cadence respectivement de 14000 et 18000 unités / heure. Les cônes de 130 et 190 ml ainsi que les coupes sont fabriquées sur la « Catta 27 ». Sur cette ligne, les cônes sont fabriqués à une cadence respectivement de 19000 et 15000 unités / heure.

L'unité Bâtonnets (S_{22}) dispose de deux lignes de fabrication S_{221} et S_{222} utilisant respectivement la « Rollo 35 / 16 » et la « Rollo 35 / 18 ». Ce sont des machines rotatives dont le numéro (16 ou 18) indique le nombre de bâtonnets réalisables par rangée. Ces machines ont des cadences de respectivement 19000 et 20000 bâtonnets / heure.

L'unité Vrac / gobelets / spaghettis / spécialités (S_{23}) dispose de 4 lignes de fabrication. Une pour les Gobelets / spaghettis (S_{231}), une pour le vrac 1L (S_{232}), une pour le vrac 2L, 2,5L et 5L (S_{233}), la dernière étant dédiée à la fabrication de spécialités telles que les pizzas aux fruits (S_{234}), qui constitue une ligne stratégique pour le développement de produits futurs.

- Le secteur du suremballage et de la palettisation (S_3) : la mise en boîte des produits fabriqués est réalisée automatiquement et manuellement (pour l'unité technologique « vrac »). Les boîtes emballées sont ensuite suremballées et convoyées vers le secteur palettisation. Des robots programmables disposent alors les produits sur des palettes. Il est à noter que toutes ces opérations sont réalisées le plus rapidement possible, afin d'éviter le réchauffement des produits.

- Le secteur chambre froide et expédition (S_4) : le stockage des palettes est réalisé dans un entrepôt frigorifique à -28°C . Les produits sont ensuite expédiés sur les lieux de ventes par camions réfrigérés, par une gestion en FIFO. La chambre froide a une capacité de 6000 palettes.

3. MULTI-MODELISATION

3.1. Modélisation fonctionnelle (Modèle GRAI)

L'utilisation du modèle GRAI pour décrire le cas exposé précédemment conduit à plusieurs grilles permettant de représenter le système et les ressources mises en œuvre pour la réalisation des trois fonctions GP, GR et PL (Figure A2.2) :

- La grille G décrit le pilotage du pôle industriel dans son ensemble ;
- Les grilles G_{S1} , G_{S2} , G_{S3} et G_{S4} décrivent le pilotage des secteurs fabrication du « Mix », production / transformation, suremballage et palettisation, chambre froide et expédition ;
- Les grilles G_{S21} , G_{S22} et G_{S23} décrivent le pilotage des unités technologiques Cônes, Bâtonnets, et Vrac / gobelets / spaghettis / spécialités ;
- Les grilles G_{S211} , G_{S212} , G_{S221} , G_{S222} , G_{S231} , G_{S232} , G_{S233} , et G_{S234} décrivent le pilotage des lignes de fabrication des Cônes, Coupes, « Rollo 35/16 », « Rollo 35/18 », Gobelets / spaghettis, vrac 1L, vrac 2L, 2,5L et 5L, et Spécialités.

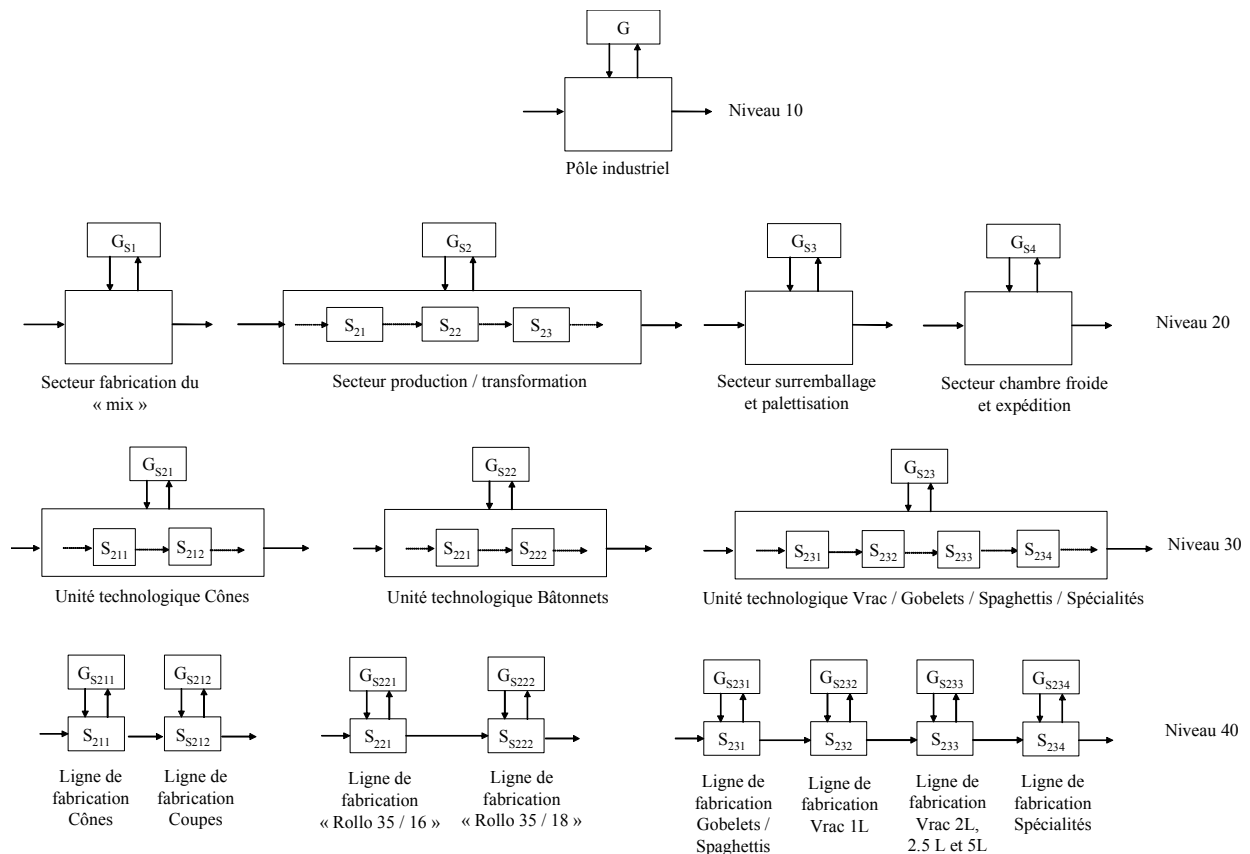


Figure A2.2 – Affectation des grilles GRAI

Nous ne détaillons ici que le secteur de production / transformation. Pour des raisons de clarté, nous ne détaillons également pas les lignes de fabrication de ce secteur. Les grilles obtenues déterminent comment les trois fonctions de la gestion de production (gérer les produits, gérer les ressources et planifier) sont pilotées à quatre niveaux décisionnels, c'est-à-dire selon quatre bases de temps distinctes. Le niveau stratégique (niveau 10 de la grille)

regroupe toutes les décisions permettant de définir les buts à atteindre sur un horizon à long ou à très long terme (Plan de Production). Le niveau tactique (20) prend en compte l'organisation du système à un niveau moyen terme (Plan de Charge), et les niveaux opérationnel (30) et temps réel (40) décrivent les activités de gestion sur le court terme et le très court terme en intégrant les contraintes techniques (Ordonnancement et Lancement de la production). Pour chaque niveau décisionnel, le nombre de ressources impliquées -c'est-à-dire la cardinalité- est pris en compte. Par exemple, aux niveaux 30 et 40, il y a respectivement trois unités technologiques et huit lignes de fabrication.

Enfin, les liens de coordination entre les différentes grilles sont définis (Figure A2.3).

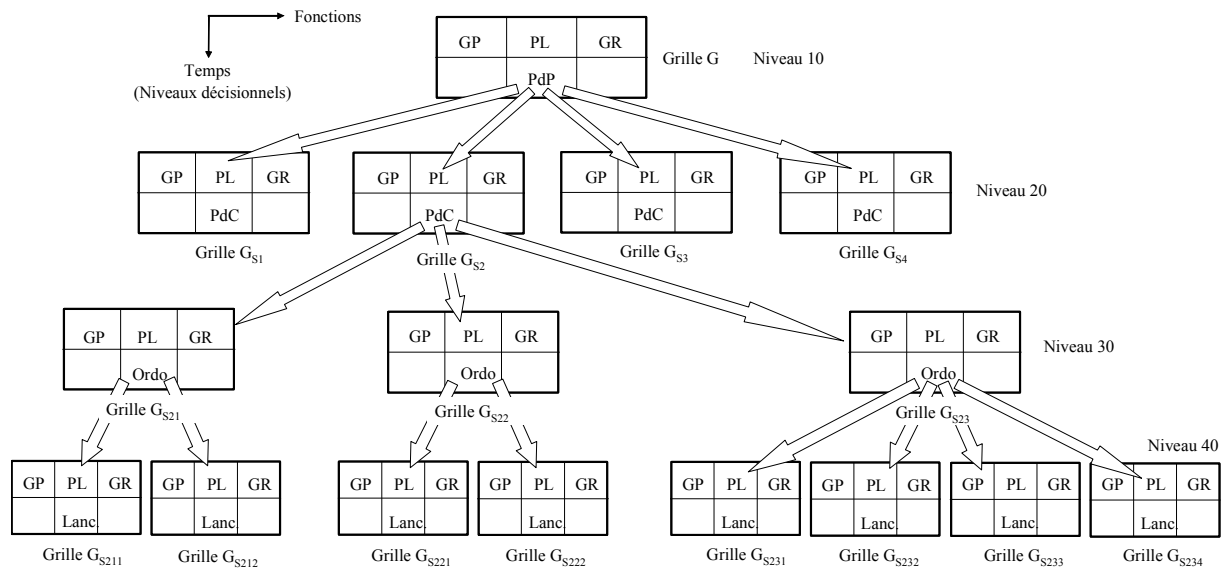


Figure A2.3 – Coordination des grilles GRAI

3.2. Modélisation organique par centres de conduite

La structure du système de conduite est isomorphe à l'organisation du système opérant : on considère que chaque entité de production quelle qu'en soit l'échelle (secteur, unité technologique, ligne de fabrication), souvent qualifiée de *centres de charge* dans le vocabulaire industriel, est pilotée par un centre de conduite. Sans doute la justification de l'architecture physique du système de production est-elle d'ordre fonctionnel lors de sa conception originelle. En phase d'exploitation cependant, l'architecture du système de pilotage épouse la structuration organique du système opérant. Les aspects fonctionnels deviennent alors implicites et la modélisation du système de pilotage se décrit dans le plan (espace, temps). L'affectation d'un centre de conduite à chaque centre de charge traduit en effet la réalisation organique du cas étudié. Les tâches de pilotage de chaque centre de conduite se réfèrent elles-mêmes à une échelle de temps (horizon, période) bien déterminée.

Appliquée à notre cas d'étude (Figure A2.4), la modélisation organique du système de pilotage nécessite donc d'identifier chaque centre de conduite et d'en caractériser le niveau d'agrégation, tant dans l'espace (périmètre du centre de charge) que dans le temps (horizon, période).

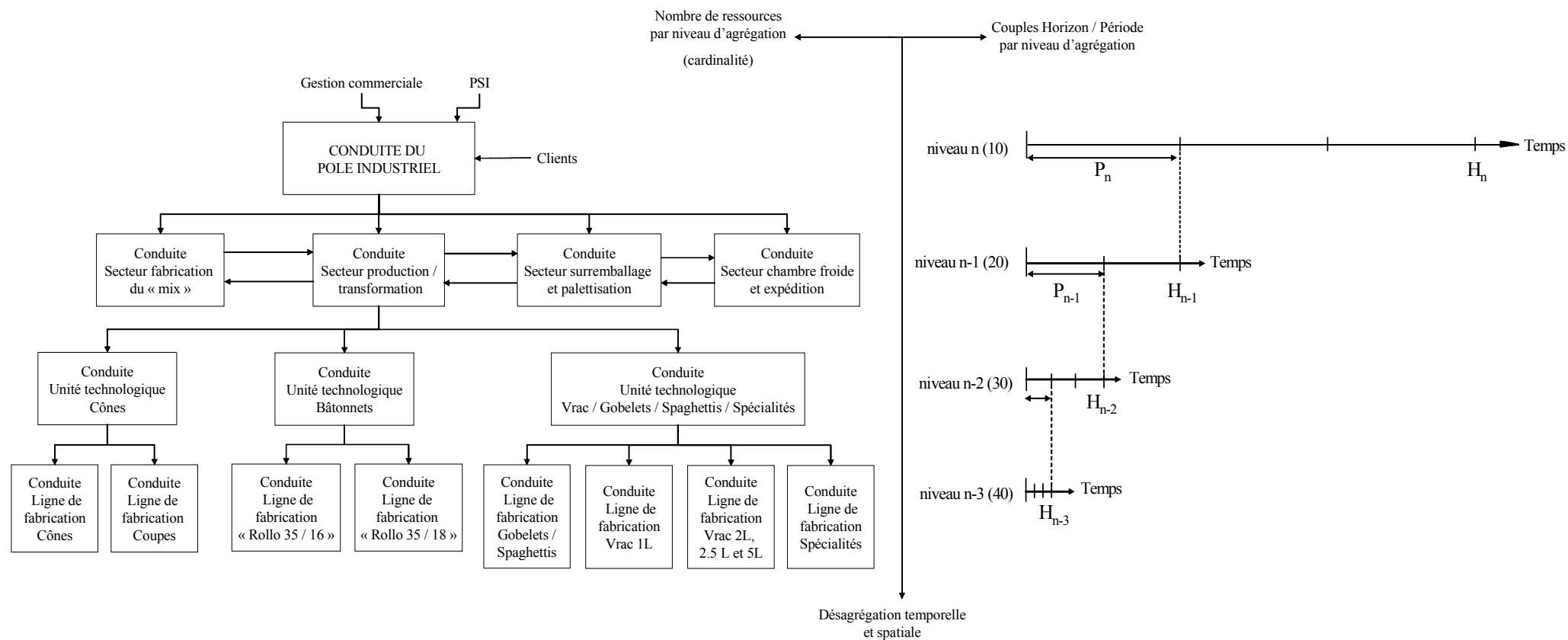


Figure A2.4 - Décomposition organique et temporelle du système de pilotage

3.3. Intégration des modèles fonctionnel et organique dans le référentiel tridimensionnel

Nous procédons maintenant à l'intégration des vues fonctionnelle et organique du système de pilotage de notre cas d'étude, en articulant le modèle de conduite GRAI et la modélisation par centre de conduites (Figure A2.5).

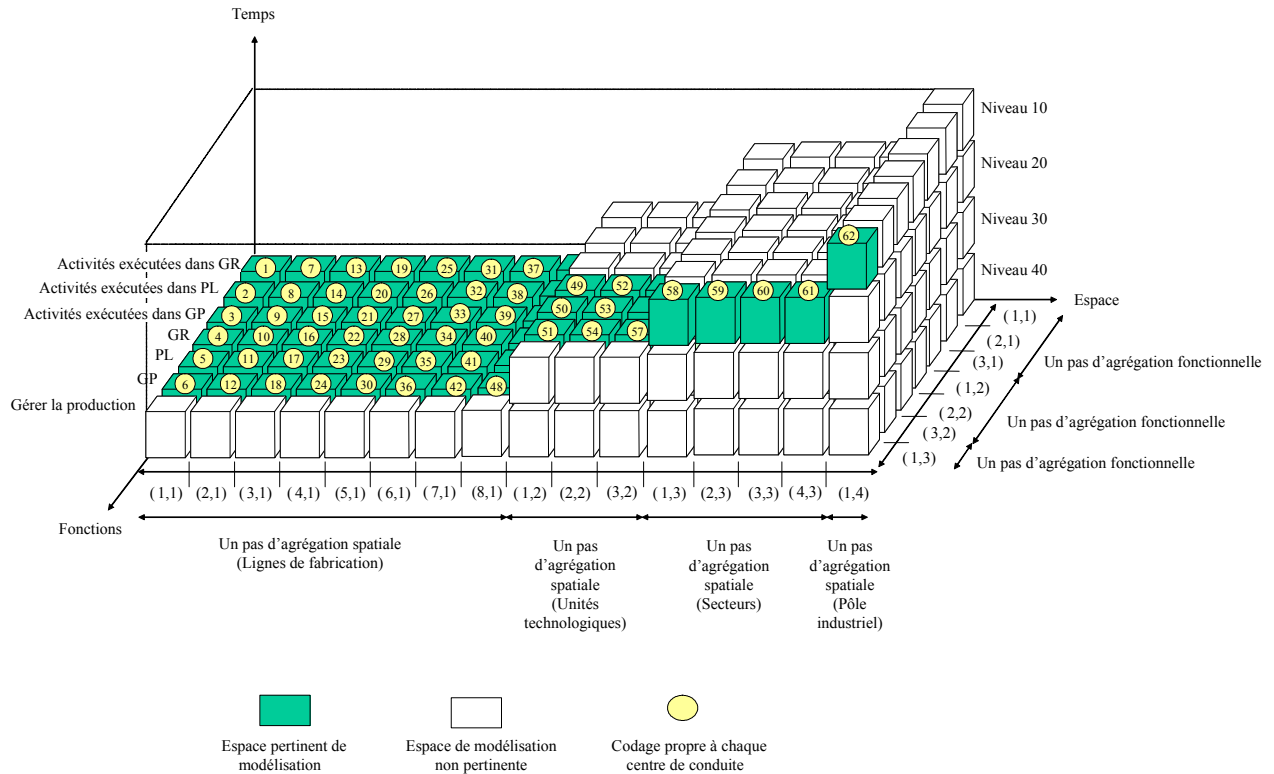


Figure A2.5 – Instanciation du modèle de référence pour le système de pilotage

La modélisation du système de pilotage dans ses différentes échelles de représentation fonctionnelle, spatiale et temporelle, amène à considérer les différentes vues des entités composant le système de conduite. Ces entités de pilotage sont modélisées fonctionnellement et / ou organiquement, et leurs modèles sont positionnés dans le référentiel (*espace, temps, fonction*) selon le degré d'agrégation considéré. Ils sont ici numérotés de 1 à 62. Nous

rappelons que chaque modèle est assimilé au triplet $\begin{pmatrix} (r, v) \\ n \\ (g, f) \end{pmatrix}$, avec :

- v son niveau d'agrégation spatiale et r son numéro d'ordre pour le niveau d'agrégation considéré, $1 \leq v \leq K1$, $1 \leq r \leq R^v$, $v, r, K1, R^v \in \mathfrak{R}$.
- n son degré d'abstraction temporelle, $1 \leq n \leq K2$, $K2 \in \mathfrak{R}$.
- f son échelle d'agrégation fonctionnelle et g son numéro d'ordre pour le niveau d'agrégation considéré, $1 \leq f \leq K3$, $1 \leq g \leq G^f$, $f, g, K3, G^f \in \mathfrak{R}$.

Dans le cas étudié :

- $K1=4$ (pôle industriel, secteurs, unités technologiques, lignes de fabrication) ;
- $K2=4$ (niveaux décisionnels 10, 20, 30 et 40) ;
- $K3=3$ (fonction globale gérer la production, fonctions (GP, GR, PL), et détail des activités de (GP, GR et PL)).

Nous avons identifié, compte tenu du couplage entre les niveaux pertinents d'agrégation (cf. § 2.3), un total de 62 modèles (Figure A2.5). Les modèles 1 à 3, 7 à 9, 13 à 15, 19 à 21, 25 à 27, 31 à 33, 37 à 39, et 43 à 45 sont les vues les plus détaillées aux plans fonctionnel, organique et spatial des centres de conduite de chacune des 8 lignes de fabrication. A l'extrême, le modèle 62 représente la vue la plus agrégée selon les trois axes et décrit la gestion de production globale de l'entreprise dans son entier, considérée au plus long terme. Entre ces deux extrêmes, les modèles obtenus représentent les trois fonctions de la gestion de la production (GP, GR et PL) au niveau moyen terme, pour la conduite des quatre secteurs de l'entreprise et des trois unités technologiques du secteur production / transformation.

4. MECANISMES D'AGREGATION

4.1 Projection suivant l'axe des espaces : instantiation du modèle fonctionnel

Le plan fonctionnel obtenu après projection selon l'axe des espaces du modèle obtenu figure A2.5 permet de retrouver, d'une part, la grille GRAI (i.e. la mise en évidence des trois fonctions GP, GR et PL suivant les différents niveaux décisionnels du système), et, d'autre part, les réseaux GRAI (i.e. le détail des activités exécutées dans GP, GR et PL) (Figure A2.6).

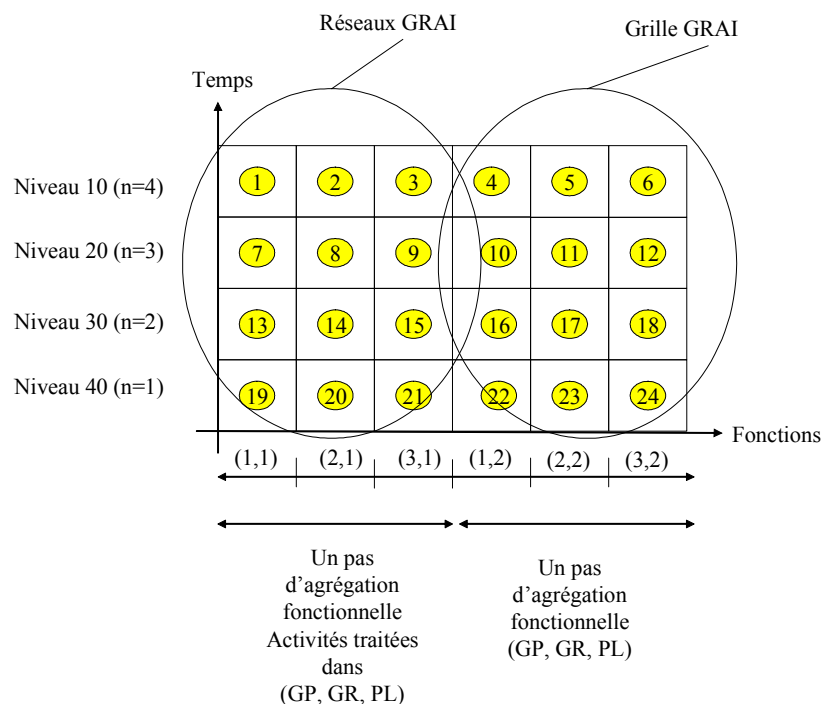


Figure A2.6 – Plan fonctionnel

Le plan obtenu permet de recenser tous les objets du modèle fonctionnel, et chaque objet est identifié par le couple $\begin{pmatrix} X = (g, f) \\ Y = n \end{pmatrix}$. Il s'agit ensuite d'identifier, grâce au Tableau 3.1 et à l'annexe 1 rappelant toutes les règles de diagnostic d'un système de gestion de production, tous les liens décisionnels et informationnels émis et / ou reçus par chaque objet du modèle. La grille GRAI finalisée est présentée ci dessous (Figure A2.7).

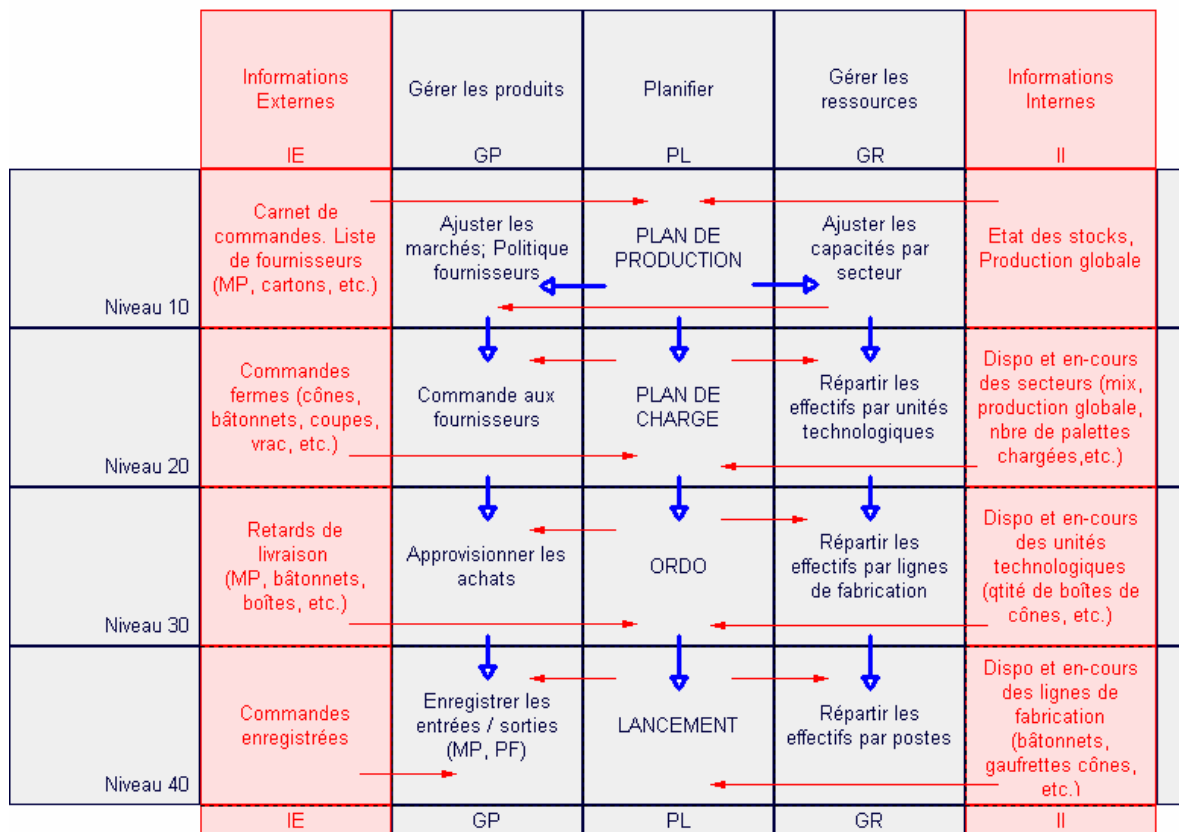


Figure A2.7 – Modélisation fonctionnelle du système de conduite par une grille GRAI

4.2 Projection suivant l'axe des fonctions : instanciation du modèle organique

Le plan organique obtenu après projection selon l'axe des fonctions du modèle obtenu figure A2.5 permet de retrouver l'architecture de centres de conduite, i.e. l'ensemble des ressources manipulées par le système, à chaque niveau décisionnel (Figure A2.8).

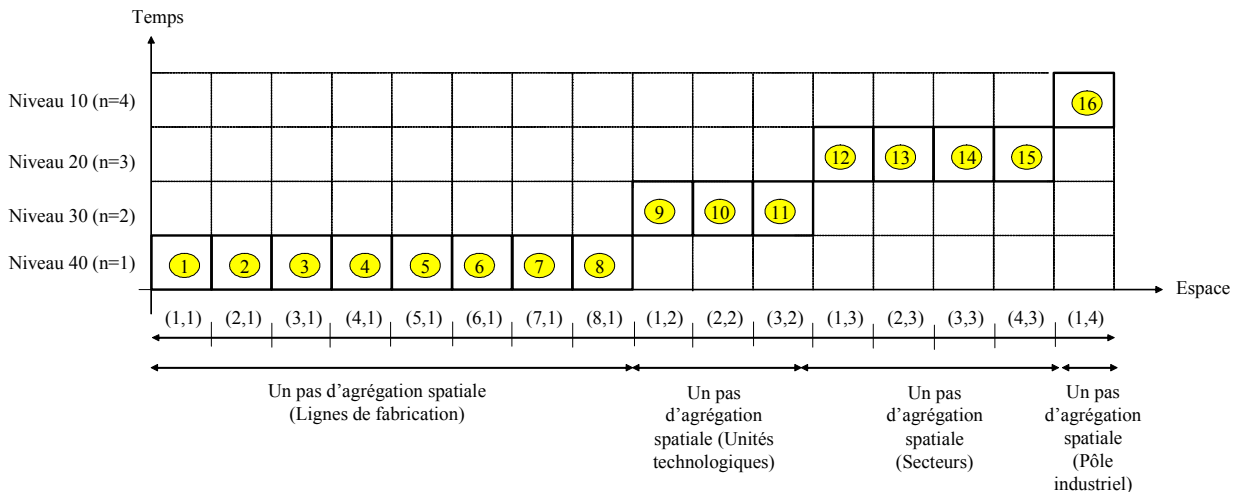
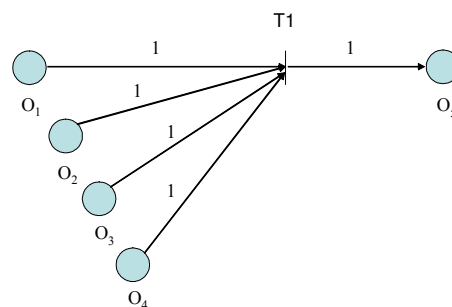


Figure A2.8 – Plan organique

Le plan obtenu permet de recenser tous les centres de conduite du modèle organique, et chaque centre est identifié par le couple $\begin{pmatrix} X = (r, v) \\ Y = n \end{pmatrix}$. Nous considérons ici que tous les liens (lien de coopération et / ou lien hiérarchique) ont été identifiés au préalable grâce à la partie « identification » de l'organigramme présenté Figure 3.17. Afin de vérifier la validité du modèle organique obtenu, nous allons maintenant effectuer les tests de cohérence verticale de ce modèle, toujours en raisonnant sur l'organigramme de la Figure 3.17. Nous n'étudierons, par souci de clarté, qu'une partie réduite du modèle, à savoir une des lignes de fabrication des bâtonnets (la « Rollo 35 / 16 »). Le processus de ce centre de conduite du niveau 40 peut se représenter au niveau le plus agrégé (noté niveau v) par le réseau de Petri représenté figure A2.9.

Figure A2.9 – Modélisation par Réseau de Petri du processus de fabrication agrégé des bâtonnets du niveau v (centre de conduite ligne de fabrication Rollo 35 / 16)

- T1 : Fabrication d'une boîte de 24 bâtonnets ;
- Unité de « Mix » de 2400 grammes (O₁) ;
- Lot de bâtonnets en bois (O₂) ;
- Papier emballage individuel (O₃) ;
- Boîte carton (O₄) ;
- Boîte de 24 bâtonnets (O₅).

Le test de cohérence des données statiques entre deux niveaux permet de vérifier les mécanismes d'agrégation / désagrégation des données statiques relatives à plusieurs centres de deux niveaux ν et $\nu-1$.

Toute transformation de niveau ν est désagrégée en un processus de niveau $\nu-1$, engendrant de nouvelles transformations (Figure A2.10).

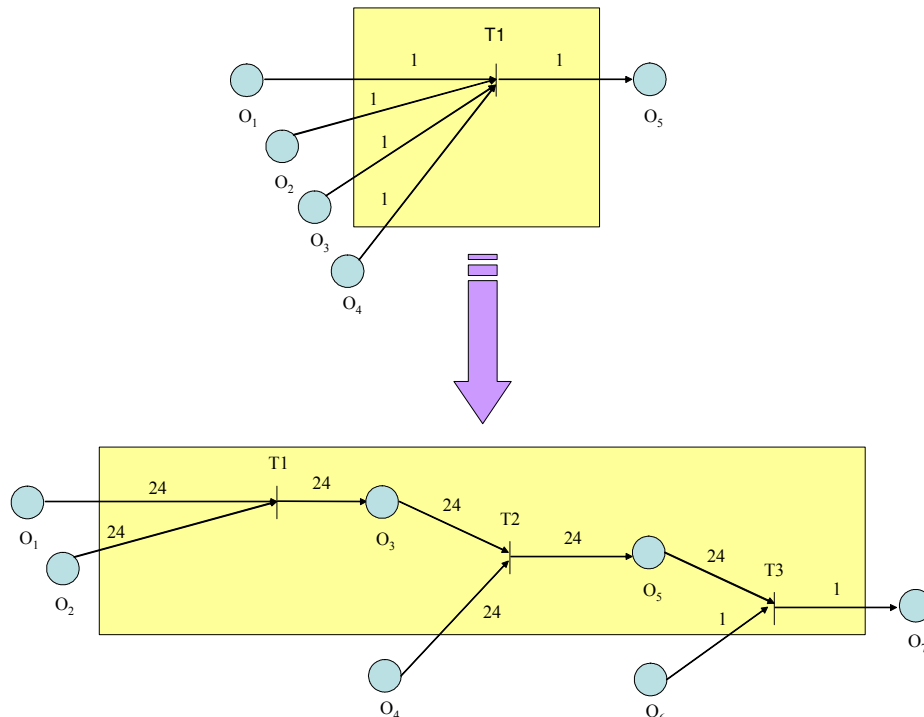


Figure A2.10 – Modélisation par Réseau de Petri du processus de fabrication désagrégé des bâtonnets du niveau $\nu-1$ (centre de conduite ligne de fabrication Rollo 35 / 16)

Les travaux désagrégés sont proportionnels aux travaux agrégés dont ils dérivent. D'après la figure A2.10, la matrice de désagrégation des transformations entre les niveaux ν et $\nu-1$ vaut :

$$N_r^{\nu, \nu-1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Les transformations T1, T2 et T3 correspondent respectivement à la dépose du « mix » sur les bâtonnets, l'emballage individuel des bâtonnets, et la mise en carton (24 bâtonnets par carton).

$\bar{O}_r^{\nu, \nu-1} = \{O_1^{\nu-1}, O_2^{\nu-1}, O_4^{\nu-1}, O_6^{\nu-1}, O_7^{\nu-1}\}$ est la nomenclature des objets de niveau $\nu-1$ dérivée de la nomenclature des objets de niveau ν , et $\underline{O}_r^{\nu, \nu-1} = \{O_3^{\nu-1}, O_5^{\nu-1}\}$ la nomenclature des objets de niveau $\nu-1$ introduits par désagrégation des transformations de niveau ν .

Dans cet exemple, la désagrégation des objets a été définie comme suit :

- un objet de type O_1^ν se désagrège en 24 objets de type $O_1^{\nu-1}$ (Unité de « mix » de 100 grammes)
- un objet de type O_2^ν se désagrège en 24 objets de type $O_2^{\nu-1}$ (Bâtonnets)

- un objet de type O_3^v se désagrège en 24 objets de type O_4^{v-1} (Emballages individuels)
- un objet de type O_4^v se désagrège en 1 objet de type O_6^{v-1} (Boîte carton)
- un objet de type O_5^v se désagrège en 1 objet de type O_7^{v-1} (Boîte de 24 bâtonnets)

Le lien de proportionnalité entre les quantités d'objets de la nomenclature $\bar{O}_r^{v,v-1}$ et ceux de la nomenclature O_r^v est donc formalisé par :

$$M_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} 24 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les objets désagrégés constituant la nomenclature $\bar{O}_r^{v-1,v}$ ne constituent qu'une partie de la nomenclature \bar{O}_r^{v-1} des objets de niveau $v-1$, définie par :

$$I_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} -24 & 0 & 0 \\ -24 & 0 & 0 \\ 24 & -24 & 0 \\ 0 & -24 & 0 \\ 0 & 24 & -24 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C_r^v = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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 :

$$M_r^{v-1,v} C_r^v = I_r^{v-1,v} C_r^{v,v-1} N_r^{v-1,v}$$

Tous calculs faits, on trouve pour le membre de droite et de gauche respectivement :

$$M_r^{v,v-1} C_r^v = \begin{bmatrix} 24 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -24 \\ -24 \\ -24 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$I_r^{v,v-1} C_r^{v,v-1} N_r^{v,v-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -24 & 0 & 0 \\ -24 & 0 & 0 \\ 24 & -24 & 0 \\ 0 & -24 & 0 \\ 0 & 24 & -24 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -24 \\ -24 \\ -24 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Les données sont donc cohérentes entre les deux niveaux v et $v-1$.

5. GESTION DES EVENEMENTS ET ANALYSE DE CRITICITE

La société étudiée fabrique des produits glacés pour la grande distribution. La particularité de l'activité de production réside dans la saisonnalité de cette dernière, mais également dans la faible marge bénéficiaire par unité de produit vendu.

La basse saison correspond à une activité de production relativement réduite (pas ou peu de ventes de produits, et stocks de l'entreprise à capacité limitée). En saison haute, l'entreprise est obligée d'avoir une maîtrise parfaite de son outil de production, qui s'explique aussi bien par la nécessité de tendre vers une production à des cadences très élevées, que par la recherche d'une fiabilité totale (toute perte ou surconsommation de matière a un impact fort au niveau financier compte tenu des marges bénéficiaires, et tout arrêt a un impact fort sur la productivité). L'apparition d'événements est de ce fait extrêmement préjudiciable pour l'entreprise, et il est impératif d'analyser la criticité des événements susceptibles d'impacter le système ou son fonctionnement, afin de lancer rapidement les actions correctives adéquates. Nous effectuons dans cet exemple une analyse de criticité pour les événements de faible et moyenne amplitudes.

5.1 Analyse de criticité des événements de faible amplitude

L'analyse de criticité des événements de faible amplitude se réfère à une grille AMDEC (Figure A2.11), dans laquelle les échelles de cotation des facteurs D, G et O représentent les attentes des différents acteurs : opérateurs des lignes, techniciens de maintenance et service des méthodes.

- L'échelle de non - détection (D) value la probabilité de ne pas détecter une défaillance potentielle quand la cause existe. La cause du dysfonctionnement peut être ici un matériel inadapté et / ou un matériel inexistant et / ou un matériel usé. Il est important de noter que le terme « probabilité » utilisé est non standard, les valeurs correspondant à ces probabilités n'étant pas situés entre 0 et 1. Volontairement, la graduation s'effectue entre 10 et 20, afin d'indiquer clairement l'ordre d'importance des différentes causes à l'origine des dysfonctionnements.

- L'échelle de gravité (G) considère la somme des cotations obtenues pour les critères propreté - hygiène, ergonomie, sécurité, état des stocks, perte de matière, retard sur les délais de fabrication, perte - casse - détérioration de matériel. La note 1 est ici attribuée à tout critère de gravité mineure ou sans conséquence, tandis que la note 25 correspond au critère de type

majeur considéré comme le plus important, à savoir ici la sécurité. L'entreprise mène en effet une campagne très active de sensibilisation des risques d'accidents du travail⁴⁹.

▪ L'échelle d'occurrence (O) est définie par la fréquence d'apparition du dysfonctionnement. Un événement exceptionnel sera affecté d'une note de 0.25, un événement peu fréquent d'une note de 0.50, et les notes 0.75 et 1 seront respectivement attribuées aux événements récurrents (hebdomadaires, quotidiens) et permanents.

L'indice de priorité I des événements à traiter est $I = D \cdot G \cdot O$

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais															Occurrence				Indice de priorité						
Matériel inadapté	Matériel inexistant	usé / Détérioré	Propreté - hygiène			Ergonomie			Etat des stocks			Pertes de matière			Perte/casse/détérioration matériel			Retards sur les délais de fabrication			Sécurité			Fréquence d'apparition du dysfonctionnement				
10	15	20	1	3	5	1	7	9	1	11	13	1	12	14	1	15	17	1	19	21	1	23	25	0.25	0.5	0.75	1	

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure A2.11 - Grille AMDEC pour l'étude des événements de faible amplitude, inspirée de [Allagama, 2004]

Soient deux événements E1 et E2 de faibles amplitudes, associés respectivement aux grilles d'analyse de criticité AMDEC, représentées par les figures A2.12 et A2.13.

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais															Occurrence				Indice de priorité						
Matériel inadapté	Matériel inexistant	usé / Détérioré	Propreté - hygiène			Ergonomie			Etat des stocks			Pertes de matière			Perte/casse/détérioration matériel			Retards sur les délais de fabrication			Sécurité			Fréquence d'apparition du dysfonctionnement				
10	15	20	1	3	5	1	7	9	1	11	13	1	12	14	1	15	17	1	19	21	1	23	25	0.25	0.5	0.75	1	
	1		1			1				1			1			1			1			1			1			

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure A2.12 – Grille AMDEC de l'événement E1

L'indice de priorité de E1 est donné par $I = 15 \cdot (1 + 1 + 11 + 1 + 1 + 19 + 1) \cdot (0.5) = 262.5$

⁴⁹ Numéros 651 et 652 de Mai et Juin 2005 du magazine « Travail et Sécurité » (ISSN 0373-1944).

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais															Occurrence				Indice de priorité					
Matériel inadapté	Matériel inexistant	usé / Détérioré	Propreté - hygiène			Ergonomie			Etat des stocks			Pertes de matière			Perte/casse/détérioration matériel			Retards sur les délais de fabrication			Sécurité			Fréquence d'apparition du dysfonctionnement			
10	15	20	1	3	5	1	7	9	1	11	13	1	12	14	1	15	17	1	19	21	1	23	25	0.25	0.5	0.75	1
		1	1				1		1				1			1			1		1			1			
(D)			(G)															(O)				(I)					

Figure A2.13 – Grille AMDEC de l'événement E2

L'indice de priorité de E2 est donné par $I = 20 \cdot (1 + 7 + 1 + 12 + 15 + 19 + 1) \cdot (0.25) = 280$

L'indice de priorité de E2 est supérieur à l'indice de priorité de E1. Ainsi, afin de lancer les actions correctives de manière efficace, il faudra traiter en premier lieu les dysfonctionnements dus à l'événement E2, même si celui-ci apparaît moins souvent que l'événement E1.

Les événements entraînant des modifications opérationnelles de l'entreprise sont courants, et font partie intégrante du quotidien. Dans cet esprit, l'entreprise s'est lancée dans une démarche d'amélioration continue (mise en place d'un « système de points rouges » axé sur l'idée de maintenance préventive et autonome), afin, d'une part, de prévenir les événements de faible amplitude et, d'autre part, de résoudre tous les dysfonctionnements qui peuvent exister dans l'atelier de production et qui concernent l'environnement de travail du salarié [Allagama, 2004]. Une telle démarche vise par là - même à prolonger la durée de vie de l'équipement et à diminuer les temps d'interventions de la maintenance corrective.

5.2 Analyse de criticité des événements d'amplitude moyenne

L'analyse de criticité des événements d'amplitude moyenne se réfère à une grille AMDEC (Figure A2.12), dans laquelle les échelles de cotation des facteurs D, G et O représentent les attentes des différents acteurs : responsables des lignes de production, responsables des unités technologiques - ou ateliers -, responsables de production

Comme précédemment, l'échelle de non - détection (D) correspond à la probabilité de ne pas détecter une défaillance potentielle quand la cause existe. L'échelle de gravité (G) est établie par la somme des cotations obtenues pour les critères emploi du temps, capacité du parc machines, productivité physique de la ligne de production et / ou du secteur. La notation s'effectue toujours de 1 à 25. Enfin, l'échelle de probabilité d'occurrence (O) est définie par la fréquence d'apparition du dysfonctionnement, et reste inchangée.

Causes du dysfonctionnement			Impacts sur la démarche qualité et sur les délais									Occurrence				Indice de priorité
Fournisseur défaillant	Faible disponibilité machine	Indisponibilité employé	Emploi du temps			Capacité du parc machines			Productivité (flux physiques)			Fréquence d'apparition du dysfonctionnement				
10	15	20	5	7	9	13	15	17	21	23	25	0.25	0.5	0.75	1	

(D)
(G)
(O)
(I)

Figure A2.14 - Grille AMDEC pour l'étude des événements d'amplitude moyenne

Au sein de l'entreprise, un système de « topp - idées » a été développé, qui encourage les employés à faire des suggestions d'amélioration sur des aspects qui entravent de façon plus large le fonctionnement de l'entreprise [Allagama, 2004]. Il s'agit de modifications organiques mineures, qui ne remettent cependant pas en cause le cœur de l'organisation de l'entreprise (par exemple, l'installation d'un plancher antidérapant pour faciliter l'accès aux convoyeurs montants et descendants, supprimant ainsi un risque de chutes de hauteur).

6. ETUDE DU PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES

Nous choisissons d'étudier le traitement des données pour le centre de décision « Plan de charge » codifié PL 20 de la grille GRAI obtenue au § 3.1 (Figure A2.15), qui correspond au pilotage technique du système. Le réseau GRAI correspondant à ce centre de décision est présenté figure A2.16.

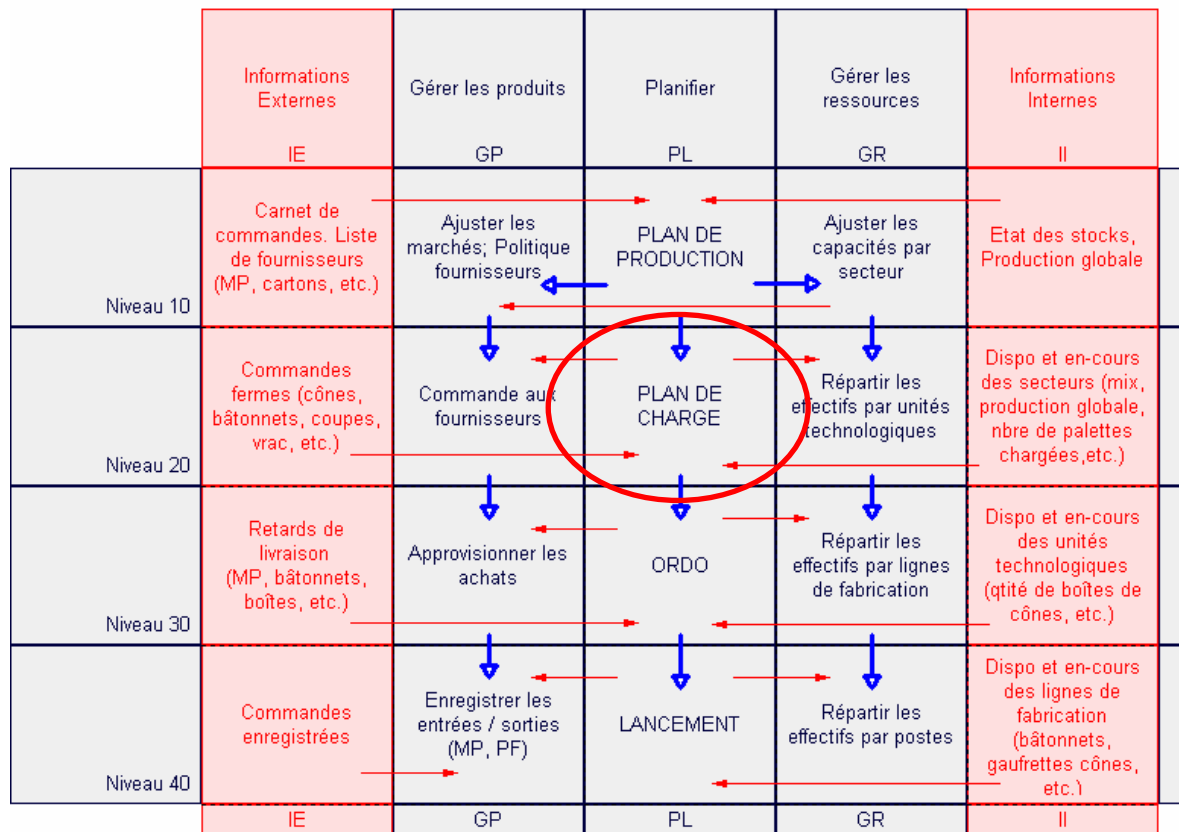


Figure A2.15 – Etude du centre de décision « Plan de charge »

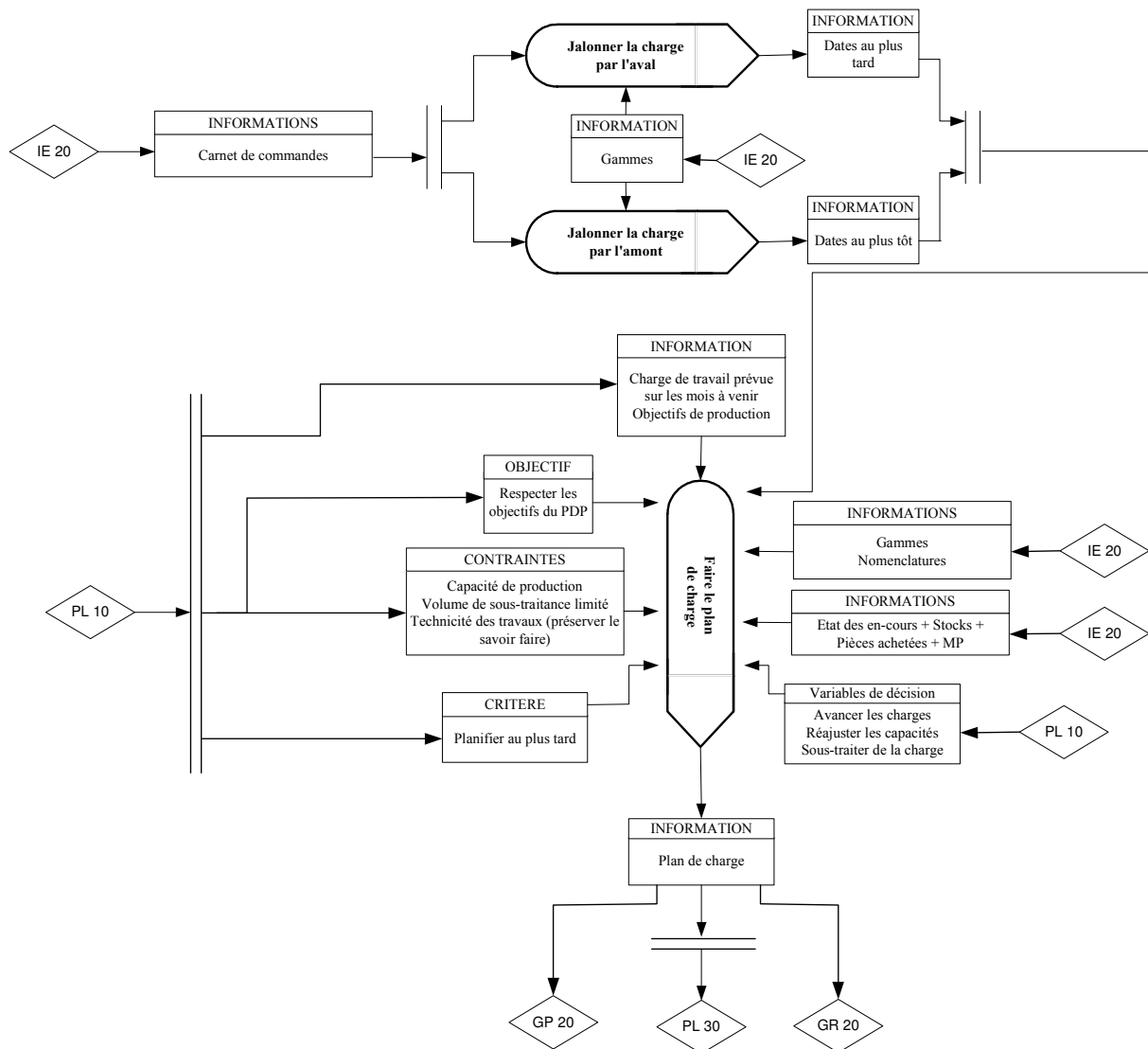


Figure A2.16 – Réseau GRAI du centre de décision PL 20 « Plan de charge »

Le centre de décision PL 20 reçoit un cadre de décision de la part du centre PL 10, ainsi que deux flux informationnels émis par les centres IE 20 et I 20, qui constituent les entités d'entrée du PTD réalisé pour le centre PL 20. Le cadre de décision contient le cadre structurel (objectifs, variables de décision, contraintes et indicateurs de performance) grâce auquel le centre PL 20 peut effectuer sa prise de décision, sur son horizon : recours ou non à un sous-traitant, détermination des besoins critiques et charge de travail envisagée. A chaque période, les données contenues dans le cadre structurel sont quantifiées. Ici, le cadre de décision contient des données déjà ordonnées, qui ont simplement besoin d'être collectées et sémantiquement adaptées au centre PL 20. De la même manière, les données en provenance du centre IE 20 sont directement reliées à l'activité de collecte. Enfin, toutes les données issues du centre PL 10 doivent être entièrement traitées. Les objectifs, horizon et période du centre PL 20 constituent les contrôles des activités du Processus de Traitement des Données (Figure A2.17, Partie 1). Les sorties du PTD viennent alors alimenter le processus de prise de décision du centre PL 20, par le biais des réseaux GRAI de ce même centre (Figure A2.17, Partie 2).

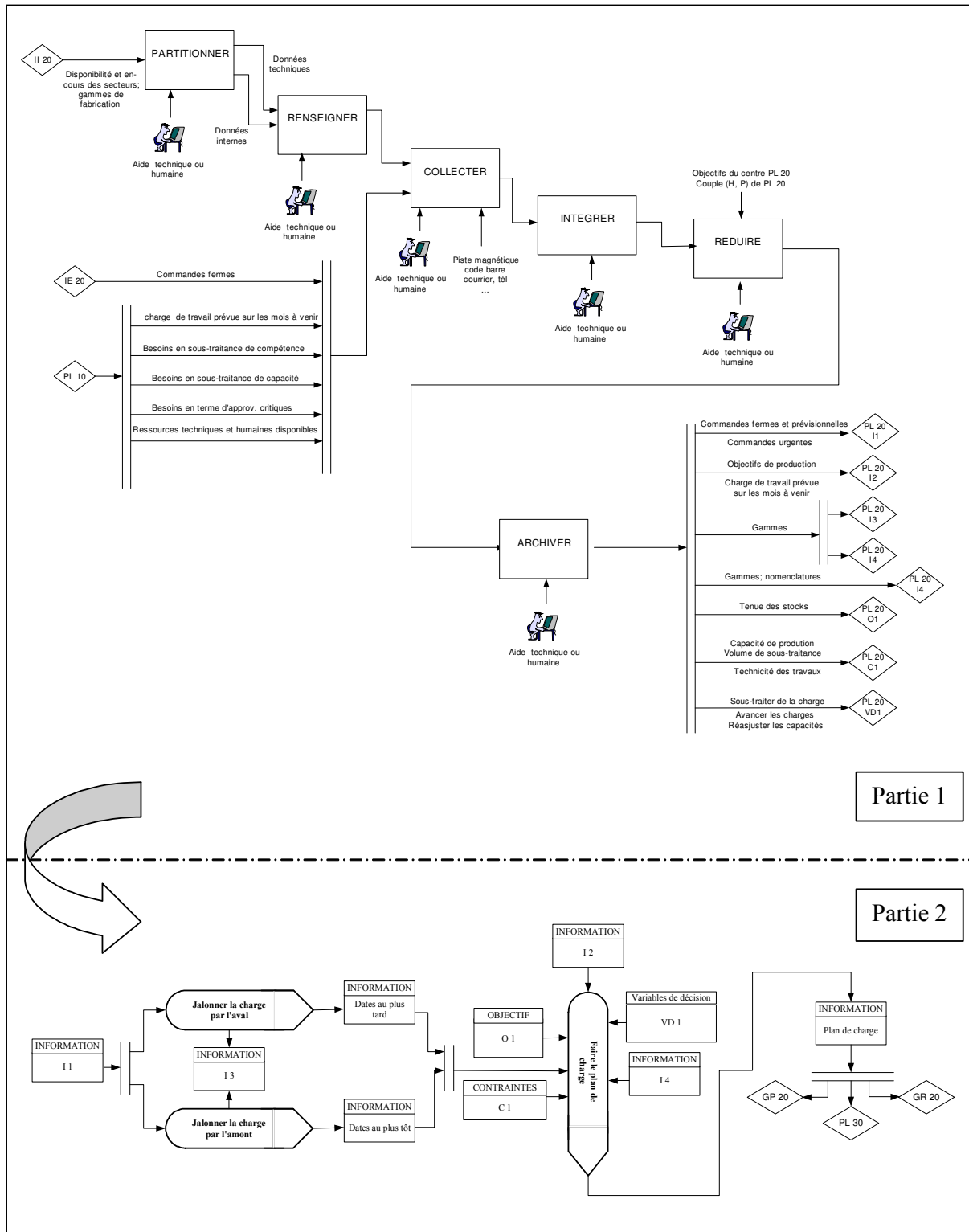


Figure A2.17 – Intégration du PTD dans le modèle décisionnel GRAI

Annexe

2

ANNEXE 2: RECAPITULATIF DES REGLES DE DIAGNOSTIC
D'UN SYSTEME DE GESTION DE PRODUCTION

Récapitulatif des règles de diagnostic d'un système de gestion de production
[Doumeingts et Ducq, 2000]

Règles de diagnostic pour le modèle global de référence (grille GRAI) :

Règle 1 :

Si

- le nombre de niveaux de prise de décision est inférieur à 3 ;

Alors

- le nombre de niveaux doit être au moins égal à 3.

Règle 2 :

Si

- le nombre de niveaux de prise de décision est supérieur ou égal à 3 ;

Alors

- il doit exister au moins un niveau long terme, un niveau moyen terme et un niveau court terme.

Règle 3 :

Si

- le nombre de niveaux de prise de décision est supérieur à 6 ;

Alors

- le nombre de niveaux doit être inférieur ou égal à 6.

Règle 4 :

Si

- un horizon H est strictement inférieur à sa période associée ;

Alors

- les décisions, pour ce niveau, ne sont jamais remises en cause.

Règle 5 :

Si

- l'horizon d'un niveau n (H_n) est inférieur à celui du niveau n-1 (H_{n-1}) ;

Alors

- il y a défaut de pilotage.

Règle 6 :

Si

- la période d'un niveau n (P_n) est inférieure à celle du niveau n-1 (P_{n-1}) ;

Alors

- il y a un défaut de pilotage.

Règle 7 :

Si

- la période P_n d'un niveau n est supérieure ou égale à l'horizon H_{n-1} du niveau n ;

Alors

- H_{n-1} doit être supérieur ou égal à $2 \cdot P_n$.

Règle 8 :

Si

- le niveau d'une grille GRAI n'a pas un horizon multiple de sa période de remise en question P ;

Alors

- la dernière période de remise en question des décisions pour cet horizon est incomplète.

Règle 9 :

Si

- un niveau n'a pas un horizon de type glissant ;

Alors

- l'horizon de ce niveau doit être glissant.

Règle 10 :

Si

- l'horizon d'un niveau de prise de décision est inférieur au cycle maximum des activités pilotées par ce niveau ;

Alors

- il y a défaut de pilotage.

Règle 11 :

Si

- un centre de décision appartenant au niveau n ne reçoit pas de cadre de décision du niveau supérieur $n+1$ ou $n+2$ et que ce centre de décision n'est pas situé au niveau le plus haut de la grille ;

Alors

- il y a un défaut de pilotage.

Règle 12 :

Si

- un centre de décision reçoit au moins deux cadres de décision et que ces cadres de décision sont d'origines différentes ;

Alors

- Il y a risque de conflit.

Règle 13 :

Si

- un cadre de décision est émis d'un centre de décision CD1 vers un autre centre CD2 ;

Alors

- des informations de suivi doivent exister dans les réseaux associés, provenant du réseau de CD1 vers celui de CD2.

Règle 14 :

Si

- un cadre de décision C est émis d'un centre de décision de la fonction F_i vers un centre de décision de F_j et que l'ensemble des relations entre éléments de base de F_j n'est pas contenu dans celui de F_i ;

Alors

- le cadre de décision est incorrect.

Règle 15 :

Si

- un cadre de décision est émis d'un niveau n vers un niveau k et que $k > n$;

Alors

- il y a inversion de contrôle.

Règle 16 :

Si

- un cadre de décision est émis d'un niveau n vers un niveau k, que $n < k$ et que $k - n > 2$;

Alors

- il y a un défaut de pilotage.

Règle 17 :

Si

- un cadre de décision est émis d'un centre de décision ;

Alors

- le réseau associé à ce centre de décision doit contenir une activité de décision.

Règle 18 :

Si

- un cadre de décision est émis du centre CDr (F_i, N) (fonction F_i , niveau N) vers le centre CD_s ($F_j, N+1$), il existe un cadre de décision de CDr vers CD_t (F_j, N), et il n'existe pas de cadre de décision entre CD_t et CD_s ;

Alors

- le centre CD_t est court-circuité.

Règle 19 :

Si

- un cadre de décision est émis du centre CDr (F_i, N) (fonction F_i , niveau N) vers le centre CD s ($F_j, N+1$), et il existe un cadre de décision de CDr vers CD t ($F_j, N+1$), et il n'existe pas de cadre de décision entre CD t et CD s ;

Alors

- le centre CD t est court-circuité.

Règle 20 :

Si

- un centre de décision ne reçoit ni cadre de décision ni flux d'information ;

Alors

- ce centre doit être lié au moins à un autre centre de décision.

Règle 21 :

Si

- un centre de décision n'émet aucun cadre de décision ;

Alors

- le centre doit produire au moins un cadre de décision.

Règle 22 :

Si

- une activité dans un réseau GRAI ne reçoit pas de support de type critères, objectifs, contraintes et variables de décision ;

Alors

- le cadre de décision émis est incomplet.

Règle 23 :

Si

- le nombre de composantes connexes d'un graphe de la grille est supérieur à 1, et que toutes les chaînes de ce graphe n'ont pas un et un seul sommet d'origine ;

Alors

- la transmission des cadres de décision de cette grille ne satisfait pas à la finalité globale du système.

Règle 24 :

Si

- le nombre de périodes H_n/P_n pour un horizon H_n d'un niveau de décision n donné n'est pas compris entre 5 et 20 ;

Alors

- le nombre de périodes H_n/P_n doit être compris entre 5 et 20.

Règle 25 :

Si

- la grille ne contient pas au moins les fonctions du type « gérer les produits », « planifier », « gérer les ressources », « informations internes » et « informations externes » ;

Alors

- le système de décision manque au moins d'une fonction fondamentale ou d'une pseudo - fonction.

Règle 26 :

Si

- une fonction F ne contient aucun centre de décision ;

Alors

- la fonction F est inutile.

Règle 27 :

Si

- un niveau n ne contient aucun centre de décision ;

Alors

- le niveau n est inutile.

Règle 28 :

Si

- deux fonctions F_i et F_j ont dans leur liste de relations entre éléments de base une relation commune ;

Alors

- il y a redondance entre les éléments de base gérés par F_i et F_j .

Règles de diagnostic pour le modèle local de référence (réseaux GRAI)Règle 29 :

Si

- un réseau R comporte plus de six activités ;

Alors

- le réseau R n'est pas conforme au principe de décomposition hiérarchique de la méthodologie GRAI.

Règle 30 :

Si

- dans un réseau R un enchaînement d'activités forme un circuit, et que l'exécution de toutes les activités du circuit nécessite obligatoirement un support produit par une autre activité appartenant au circuit ;

Alors

- le circuit R contient un circuit erroné d'activités.

Règle 31 :

Si

- le réseau correspondant à un centre de décision ne comporte aucune information de suivi ;

Alors

- le système piloté par le centre de décision n'est pas maîtrisé.