



**HAL**  
open science

# Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées

Carlos Herrera

► **To cite this version:**

Carlos Herrera. Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées. Automatique. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2011. Français. NNT : 2011NAN10046 . tel-01746192v2

**HAL Id: tel-01746192**

**<https://theses.hal.science/tel-01746192v2>**

Submitted on 10 Nov 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées.

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 28 Juin 2011

pour l'obtention du

**Doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy 1**  
(en Automatique, Traitement du Signal, Génie Informatique)

par

Carlos Herrera

### Composition du jury

*Rapporteurs :* Pr. Alexandre Dolgui École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne  
Pr. Damien Trentesaux Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

*Examineurs :* Pr. Paul Valckenaers Katholieke Universiteit Leuven  
Pr. Gérard Morel Nancy Université  
Pr. André Thomas Nancy Université (Directeur de Thèse)  
Mcf. Sana Belmokhtar Nancy Université

Mis en page avec la classe thloria.

## Remerciements

En premier, je voudrais remercier mon directeur de thèse André Thomas. J'ai appris beaucoup de son grand professionnalisme, de son dynamisme et de sa vision relative à la recherche. Son aide et sa disponibilité au travail ont été fondamentales pour faire aboutir ces travaux de thèse. Je voudrais aussi remercier ma co-encadrante Sana Belmokhtar Berraf, que je remercie pour son intérêt et engagement. De ces deux personnes j'ai appris beaucoup de choses qui vont m'aider pour continuer mon parcours professionnel.

Je voudrais aussi remercier tous mes amis que j'ai eus dès mon arrivée au laboratoire, qui ont toujours été disponibles pour m'aider. Je voudrais spécialement remercier Cristian Duran, Nicolas Salles, Pierre Cocheteux, Idriss Diouri, Dragos Dobre et Cheick-Tidjane Kone. Mes remerciements vont aussi à Patrick Charpentier qui a fait toutes les formalités de gestion relatives à mon arrivée au CRAN. J'ajouterais mes plus sincères remerciements à mon ami Gilbert Habib qui a été toujours avec nous depuis notre arrivée.

Je voudrais encore remercier les autres membres du CRAN avec lesquels j'ai eu l'opportunité de discuter autour des thématiques de recherche de notre équipe, en particulier, je voudrais remercier Gérard Morel, Rémi Pannequin, Vincent Lecuire, Jean-Philippe Georges, Philippe Thomas, Alexis Aubry, David Gouyon et Jean-Philippe Auzelle. Mes remerciements vont de même aux responsables du CRAN pour avoir su maintenir une atmosphère de travail très agréable, en particulier, à notre directeur Alain Richard qui a toujours motivé l'esprit nécessaire à la recherche. Je voudrais de plus remercier les personnels administratifs, spécialement Christelle Kondratow, Corinne Champale, Marc Soro et même s'il est à ce jour chez-lui, Michel Braucourt, pour avoir toujours été très disponibles pour résoudre nos problèmes du quotidien. Je fais aussi une mention spéciale pour le travail de notre secrétariat administratif réalisé par Anne Piant qui nous a aidé toujours à simplifier les difficiles travaux de l'après thèse. Mes plus sincères remerciements pour son grand professionnalisme.

Je voudrais citer aussi toute cette partie du CRAN, que j'ai eu la chance de connaître et avec laquelle j'ai travaillé avec l'objectif de faire aboutir des nouvelles idées de recherche. Ses idées deviendront concrètes par les efforts de l'ensemble des doctorants qui sont à la base de ce processus. Pour cela, j'encourage tous les jeunes doctorants à aboutir dans leurs travaux, dans leurs idées et leurs projets. Je les remercie d'avoir partagé avec moi cette très agréable étape de ma vie. Je citerais encore spécialement Gabriela Medina, Leila Makkaoui, Esma Yahia, Sylvain Kubler, Jérémy Jobert, Thomas Ruin, Romain Lieber, Jérémy Jover, Yongxin Liao et Alexandre Reitz. Mes remerciements vont aussi aux jeunes ingénieurs de recherche Ludovic Rizzolo, et spécialement, Arnould Guidat pour son très grand engagement au développement de l'application qui nous a permis tester et valider nos propositions.

Je ne saurais pas finir sans remercier mon épouse Isabel ainsi que mes enfants Diego y Dario pour m'avoir soutenu, au quotidien et sans faille, dans mes projets et m'avoir donné la force d'aboutir à mes objectifs ; je vous aime.

Finalement, ces travaux de thèse, n'auraient pas pu être possibles sans l'aide du gouvernement du Chili qui a cru dans mes qualités par l'intermédiaire de la bourse Président de la République du Chili. Et enfin mes remerciements vont à la belle ville de Nancy pour nous avoir accueillis et pour m'avoir permis de vivre cette très enrichissante expérience.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>vii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Chapitre 1 Contexte, définitions et problématique générale</b>	<b>1</b>
1.1 Les systèmes conventionnels de planification et de pilotage de la production	3
1.1.1 Les systèmes MRP2 . . . . .	3
1.1.2 Les systèmes JiT . . . . .	8
1.1.3 La Théorie des Contraintes ou le management par les contraintes . . . . .	9
1.1.4 Les ERP . . . . .	10
1.1.5 Les systèmes de planification avancée . . . . .	12
1.1.6 Analyse critique des approches centralisées . . . . .	13
1.2 Les Systèmes Intelligents de Production . . . . .	14
1.2.1 Les systèmes bioniques . . . . .	16
1.2.2 Les systèmes fractals . . . . .	16
1.2.3 Les systèmes holoniques . . . . .	16
1.2.4 Systèmes contrôlés par le produit . . . . .	17
1.2.5 Analyse critique des approches IMS . . . . .	17
1.3 Problématique générale . . . . .	19
1.4 Conclusion . . . . .	20
<b>Chapitre 2 Systèmes hybrides centralisés/distribués</b>	<b>21</b>
2.1 Systèmes hybrides ERP - JiT . . . . .	22
2.2 Systèmes hybrides holoniques et basés sur des agents . . . . .	24
2.2.1 YAMS . . . . .	25
2.2.2 AARIA . . . . .	26
2.2.3 METAMORPH . . . . .	26

2.2.4	PROSA . . . . .	27
2.2.5	InterRRaP . . . . .	29
2.2.6	ExplanTech . . . . .	30
2.2.7	ADACOR . . . . .	31
2.2.8	Pabadis Promise . . . . .	33
2.2.9	Autres approches . . . . .	34
2.3	Systèmes contrôlés par le produit . . . . .	34
2.4	Conclusion et objectifs spécifiques des travaux de thèse . . . . .	40
<b>Chapitre 3 Cadre de modélisation basé sur le Modèle de Système Viable</b>		<b>41</b>
3.1	Le Modèle de Système Viable . . . . .	42
3.1.1	Fonctions dans le modèle de système viable . . . . .	43
3.1.2	Variété et récursivité . . . . .	44
3.1.3	Avantages de l'approche . . . . .	45
3.2	VSM comme cadre de modélisation pour des systèmes contrôlés par le produit ( VSM-SCP ) . . . . .	49
3.2.1	Quelques idées de base . . . . .	49
3.2.2	Le produit intelligent comme un système viable . . . . .	50
3.2.3	Implémentation des systèmes contrôlés par le produit . . . . .	52
3.3	Modélisation d'un système PPP hybride contrôlé par le produit ( VSM-SCP-PPP ) . . . . .	52
3.4	Conclusion . . . . .	58
<b>Chapitre 4 Système hybride centralisé/distribué pour la planification et le pilotage de la production</b>		<b>59</b>
4.1	Les systèmes PPP et leurs problématiques associées . . . . .	60
4.1.1	Formulation mathématique des mesures pour la nervosité . . . . .	61
4.1.2	Formulation mathématique de l'instabilité . . . . .	63
4.2	Système hybride centralisé/distribué . . . . .	63
4.3	Décisions centralisées niveau PDP . . . . .	65
4.3.1	Un modèle CLSP comme modèle de base . . . . .	65
4.3.2	Modèle pour la réduction de l'instabilité . . . . .	67
4.4	Décisions centralisées niveau lot-streaming . . . . .	69
4.5	Modèle monolithique pour le lot-sizing et le lot-streaming . . . . .	72
4.6	Décisions distribuées au niveau des sous-lots . . . . .	76

---

4.6.1	Faisabilité de la division des lots . . . . .	78
4.6.2	Évaluation des alternatives . . . . .	79
4.7	Conclusion . . . . .	82
<b>Chapitre 5 Résultats expérimentaux</b>		<b>83</b>
5.1	Cas d'étude . . . . .	83
5.2	Phase expérimentale de la partie centralisée . . . . .	85
5.2.1	Description de l'expérimentation . . . . .	85
5.2.2	Étude du paramètre $\phi$ . . . . .	87
5.2.3	Résultats expérimentaux du modèle $M_I$ . . . . .	88
5.3	Phase expérimentale système hybride . . . . .	92
5.3.1	Description de l'expérimentation . . . . .	92
5.3.2	Résultats expérimentaux . . . . .	92
5.3.3	Indicateurs globaux . . . . .	93
5.3.4	Indicateurs de flux . . . . .	95
5.4	Conclusion . . . . .	98
<b>Conclusion générale et perspectives</b>		<b>99</b>
<b>Annexes</b>		<b>103</b>
<b>Annexe A Détails de l'application</b>		<b>103</b>
<b>Annexe B Modèles pour la minimisation de la nervosité</b>		<b>105</b>
<b>Glossaire</b>		<b>107</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>109</b>



# Introduction générale

Le contexte économique incluant la mondialisation et la libre concurrence, les évolutions rapides des différentes technologies à disposition des industriels et usagers, ont poussé les entreprises à être toujours plus réactives, toujours plus innovantes, toujours plus agiles.

Cette thèse menée au CRAN (Centre de recherche en Automatique de Nancy) s'inscrit dans la continuité de travaux de recherche conduits selon deux axes et adressant cette question en proposant de nouvelles solutions relatives au domaine du pilotage des flux de produits intra ou inter-entreprises. L'un de ces axes traite de la planification tactique, l'autre de décisions distribuées à même le flux physique : le produit en étant l'acteur principal.

Les travaux du premier axe ont proposé diverses voies pour la planification tactique robuste et stable. S'il a pu être démontré qu'un tel résultat pouvait être mis en œuvre au niveau du PIC (Plan Industriel et Commercial) dans la thèse de P. Genin, il a été aussi démontré que conserver ces qualités de stabilité et de robustesse au niveau du PDP (Programme Directeur de Production) en désagrégeant ce premier niveau est très difficile (thèse de V. Ortiz). C'est pourquoi les présents travaux apporteront une réponse à cet objectif de stabilité du PDP.

Les travaux du deuxième axe ont proposé diverses architectures et modèles d'aide à la décision pour les SCP (Systèmes Contrôlés par le Produit). Ils ont pu montrer, d'une part, la pertinence de ce concept et, d'autre part, que les objectifs de réactivité et d'agilité pouvaient être adressés de cette manière. Les thèses de T. Klein et de H. El Haouzi ont appliqué ces principes dans un contexte de flux tirés. Les travaux de R. Pannequin ont conduit à proposer des solutions bio-inspirées pour le contrôle des SCP.

Nos travaux de thèse ont pour vocation de relier ces deux axes de recherche en proposant un « système hybride », nommé VSM-SCP, ayant les qualités des deux systèmes précédents, à savoir, la stabilité des systèmes centralisés et l'agilité des SCP. Ils proposeront dans un premier temps un cadre générique de modélisation qui s'appuie sur une proposition de S. Beer nommée VSM (Viable System Model) se rapportant initialement aux systèmes vivants. Ils proposeront aussi, dans un deuxième temps, toute une architecture de modèles d'optimisation, pour certains centralisés, pour d'autres distribués et mis en œuvre par des agents logiciels, applicables pour chacun des niveaux du cadre générique.

Ainsi, le document de thèse est structuré de la manière suivante : Le premier chapitre de la thèse décrit l'évolution des systèmes de planification et de pilotage de la production (PPP). Il a pour objectif d'identifier les forces et faiblesses des différentes approches proposées jusqu'à nos jours et de permettre de définir l'objectif général de la thèse. Celui-ci est

donc de proposer un système hybride de pilotage de flux dotant ainsi les entreprises d'un outil les aidant à obtenir plus de réactivité sans pour autant dégrader leurs performances financières établies dans les niveaux « supérieurs » du système de décision.

Le chapitre deux analyse l'état de l'art concernant les outils de modélisation des systèmes de production centralisés/distribués et aussi le concept de contrôle par le produit. Ce chapitre sert de base pour définir les objectifs spécifiques de la thèse. Ceux-ci sont donc de proposer un cadre générique de modélisation et de simulation de planifications logistiques dans un contexte où le produit est acteur. Le rôle de celui-ci étant dans notre cas de prendre des décisions en réaction à des événements non prévus survenant lors de l'activation du flux de produits.

Le chapitre trois présente le cadre de modélisation proposé. Ce cadre est basé sur une approche cybernétique, et plus spécifiquement sur le modèle de système viable (VSM). Le chapitre démarre avec une présentation générale du modèle de système viable, puis présente un modèle générique de modélisation de systèmes contrôlés par le produit. Enfin, le chapitre décrit une application de ce cadre général aux systèmes de planification et pilotage de la production de type SCP. Nous l'avons nommé VSM-SCP.

Le chapitre quatre définit les différentes méthodes de décision, tant centralisées que distribuées, développées pour l'implémentation du modèle générique défini dans le chapitre trois. Aux niveaux centralisés et distribués ces méthodes sont basées sur des modèles de programmation mathématique développés pour considérer l'adaptabilité et la flexibilité du système.

Le chapitre cinq montre les principaux résultats dans une application basée sur un cas industriel qui a nécessité le développement d'un outil de simulation qui considère des variables de court, moyen et long termes pour les différents modèles d'optimisation. Ces résultats montrent l'intérêt de ce type d'hybridation.

La conclusion présente un bilan de la démarche et propose des perspectives permettant de tester d'autres modes distribués de contrôle des produits. Une perspective d'implémentation sur la plate forme TRACILOGIS est donc envisagée.

# Table des figures

1.1	Le système MRP2 . . . . .	4
1.2	Niveaux de décision . . . . .	5
1.3	Prises de décision hiérarchisées . . . . .	8
1.4	Le concept de système ERP . . . . .	11
1.5	La matrice de planification de la chaîne logistique . . . . .	12
1.6	Modules de logiciels qui supportent la chaîne logistique . . . . .	13
2.1	YAMS . . . . .	25
2.2	Communauté des agents du AARIA . . . . .	27
2.3	Caractéristiques de base des agents dans METAMORPH . . . . .	28
2.4	Blocs de construction de base dans PROSA . . . . .	29
2.5	Architecture d'un agent en InteRRaP . . . . .	30
2.6	Schéma pour l'implémentation d'ExplanTech . . . . .	31
2.7	Classes d'agents dans ADACOR . . . . .	32
2.8	Niveaux de décision dans Pabadis Promise . . . . .	33
2.9	Architecture interopérable pour le niveau contrôle . . . . .	36
2.10	Impact général des systèmes Auto-ID en la boucle de contrôle . . . . .	37
2.11	Structure du système d'information en réseaux . . . . .	38
2.12	Contrôle par le produit des chaînes logistiques . . . . .	39
3.1	Loi de la variété requise . . . . .	45
3.2	Fonction d'intelligence . . . . .	45
3.3	Fonctions dans un Système Viable . . . . .	46
3.4	Exemple d'un Système Viable . . . . .	46
3.5	Le produit modélisé comme un système viable . . . . .	51
3.6	Modèle VSM générique pour des systèmes contrôlés par le produit . . . . .	53
3.7	Système hybride de planification et pilotage de la production . . . . .	55
3.8	Communautés d'agents pour la planification et le contrôle . . . . .	56
4.1	Système hybride centralisé/distribué . . . . .	64
4.2	Fonctions du système . . . . .	66
4.3	Initialisation du PDP . . . . .	69
4.4	Lot-streaming central . . . . .	72
4.5	PDP Monolithique . . . . .	73
4.6	Décision Distribuée . . . . .	77

Table des figures

---

4.7	Caractérisation des perturbations . . . . .	78
4.8	Dégradation du $C_{max}$ . . . . .	78
4.9	Interface Homme-Machine décision distribuée . . . . .	81
5.1	Cellule de production . . . . .	84
5.2	Vision agrégée de la cellule de production . . . . .	84
5.3	Schéma de simulation. . . . .	87
5.4	Deux cas de compromis dans le processus de prise de décision entre les mesures du coût total ( $f_P^*$ ), de l'instabilité ( $I$ ) et de la nervosité ( $NG$ and $NL$ ). . . . .	87
5.5	Différences entre $M_P$ et $M_I$ concernant le coût total (a) et l'instabilité (b). . . . .	88
5.6	Différences entre $M_P$ et $M_I$ concernant la nervosité. . . . .	89
5.7	Différences entre $M_I$ et $M_{NG}$ concernant le coût total (a) et l'instabilité (b). . . . .	89
5.8	Différences entre $M_I$ et $M_{NG}$ concernant la nervosité. . . . .	89
5.9	Différences entre $M_I$ et $M_{NL}$ concernant le coût total (a) et l'instabilité (b). . . . .	90
5.10	Différences entre $M_I$ et $M_{NL}$ concernant la nervosité. . . . .	90
5.11	Nervosité $NG$ . . . . .	93
5.12	Nervosité $NL$ . . . . .	94
5.13	Coût de production $C$ . . . . .	94
5.14	Instabilité $I$ . . . . .	95
5.15	$C_{max}$ . . . . .	96
5.16	Variabilité du $C_{max}$ . . . . .	96
5.17	Stock . . . . .	97
5.18	Variabilité du WIP . . . . .	97
5.19	Solutions distribuées . . . . .	98
A.1	Diagramme de classes . . . . .	103
A.2	Diagramme d'activités décision distribuée . . . . .	104

# Chapitre 1

## Contexte, définitions et problématique générale

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Les systèmes conventionnels de planification et de pilotage de la production . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1.1	Les systèmes MRP2 . . . . .	3
1.1.2	Les systèmes JiT . . . . .	8
1.1.3	La Théorie des Contraintes ou le management par les contraintes	9
1.1.4	Les ERP . . . . .	10
1.1.5	Les systèmes de planification avancée . . . . .	12
1.1.6	Analyse critique des approches centralisées . . . . .	13
<b>1.2</b>	<b>Les Systèmes Intelligents de Production . . . . .</b>	<b>14</b>
1.2.1	Les systèmes bioniques . . . . .	16
1.2.2	Les systèmes fractals . . . . .	16
1.2.3	Les systèmes holoniques . . . . .	16
1.2.4	Systèmes contrôlés par le produit . . . . .	17
1.2.5	Analyse critique des approches IMS . . . . .	17
<b>1.3</b>	<b>Problématique générale . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>1.4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>20</b>

---

Après la deuxième révolution industrielle au début du XXe siècle, l'une des innovations les plus importantes a été le développement de la ligne d'assemblage qui est un processus industriel dans lequel les pièces (en général interchangeables) sont assemblées les unes aux autres de manière séquentielle. Pour augmenter la productivité, le travail autour de la ligne est alors optimisé réduisant ainsi le temps de cycle. La ligne d'assemblage développée par la *Ford Motor Company* a introduit dans les décennies suivantes le concept de *production de masse*. Également appelée production en flux ou encore production en série, elle fait référence à la production de grandes quantités de produits standardisés. Depuis cette époque, l'industrie n'a cessé d'introduire de nouvelles technologies allant vers une

automatisation des processus ainsi qu'une optimisation des activités de planification et de pilotage de la production.

À partir des années cinquante, les machines à commande numérique sont introduites et les premiers robots industriels font leur apparition. Ces processus étaient assistés par des ordinateurs de grandes tailles et de coûts onéreux, ce qui ne permettait pas une utilisation massive. Il a fallu attendre l'apparition des microprocesseurs au début des années soixante-dix, pour que les coûts des ordinateurs soient radicalement baissés et que leurs usages commencent à se multiplier. L'un des effets principaux dans l'industrie, avec l'avènement des microprocesseurs, a été l'utilisation massive des Automates Programmables Industrielles (API), dont le développement a été incité principalement par les besoins de l'industrie automobile. C'est à cette époque que l'on voit apparaître aussi des concepts comme l'Ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO) et la Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

Concernant les systèmes de planification et de pilotage de la production, on a vu émerger dans les années soixante, les systèmes MRP1 (Material Requirement Planning). Ces systèmes s'appuyaient principalement sur les prévisions de la demande pour organiser la production. Ce système gérait aussi l'ensemble des composants nécessaires pour la fabrication (la nomenclature). Un des principes des systèmes MRP1 est la planification à capacité infinie. Ceci signifie que le système crée les ordres de production par rapport à la demande sans considérer la capacité réelle des ressources à engager. Lorsque la capacité est insuffisante, le problème peut se résoudre, par exemple, par des techniques de lissage de la charge. Une autre caractéristique des systèmes MRP1 est qu'ils travaillaient dans une logique de boucle ouverte, c'est-à-dire, une fois que les décisions sont obtenues, il n'est pas possible d'obtenir un retour d'information relatif aux effets (Vollman et al. 1997).

Le système de gestion de la production de type MRP1 est une alternative aux méthodes traditionnelles de gestion des stocks basées sur le lot économique. Bien que les systèmes MRP1 apportent des réponses aux problèmes liés aux retards d'ordres, de consommation discontinue du stock ou encore de gestion de la consommation future de matières premières, ils ne restent que des systèmes utiles pour *lancer des ordres*.

Pour combler ces limites, les générations suivantes des systèmes MRP ont été conçus avec une logique de boucle fermée (Vollman et al. 1997). Ces systèmes résolvent les faiblesses des systèmes MRP1 principalement de quatre façons :

1. Par leur processus d'adéquation charge/capacité qui permet de s'assurer que les ordres générés par le MRP seront faisables.
2. Par la surveillance de l'exécution des plans.
3. Par l'envoi de messages aux décideurs.
4. Par la considération de la boucle fermée.

Cette nouvelle classe de systèmes dénommée systèmes MRP2 (Manufacturing Resource Planning), marque l'origine des systèmes modernes de planification et de pilotage de la production.

Ce chapitre présente de manière générale l'évolution des systèmes de planification et de pilotage jusqu'à nos jours. Les principaux concepts y sont introduits en montrant comment

les besoins et les exigences de l'industrie, en plus du développement technologique, ont fait évoluer ces systèmes, tout ceci permettant ainsi de présenter le cadre contextuel de nos travaux.

La première partie est consacrée à l'évolution des systèmes centralisés. Ces derniers, initialement de type MRP2, ont évolués et ont donné naissance aux systèmes APS (Advanced Planning and Scheduling). Nous verrons que ces systèmes sont principalement basés sur la centralisation de la prise de décision et que leur développement est principalement marqué par l'augmentation croissante du nombre de fonctions comprises. De plus, ces systèmes sont marqués par une sophistication croissante des techniques d'optimisation utilisées, mais en conservant toujours une vision hiérarchique de la prise de décision. Notons que les travaux de recherche associés à ce type de systèmes *centralisés* sont toujours aussi nombreux jusqu'à notre époque, et que ceux-ci correspondent aux systèmes plus amplement mis en application dans l'industrie. Jusqu'alors les entreprises avaient installé ce type de systèmes essentiellement pour des raisons de coût, mais également par le fait de leur incapacité à obtenir des informations détaillées en temps réel issues de leur production.

Dans la deuxième partie, nous présentons le second grand courant de recherche qui s'intéresse aux systèmes intelligents de production ou de logistique. Les nouveaux systèmes conçus à partir de ce courant (au début de 1990), changent radicalement la vision de la prise de décision logistique en passant de la perspective centralisée conventionnelle à une perspective distribuée de ces décisions. Ce changement de perspective est basé sur les nouvelles nécessités de l'industrie en termes de flexibilité et de réactivité. Ainsi, ces nouveaux systèmes se proposent de donner une réponse à des problématiques comme : la reconfigurabilité, l'interopérabilité, la gestion du facteur d'échelle et la réutilisabilité.

À la fin de ce chapitre, nous proposons une analyse des avantages et inconvénients de ces deux grands courants de recherche et une proposition basée sur une démarche qui intègre ces deux visions du processus de décision.

## 1.1 Les systèmes conventionnels de planification et de pilotage de la production

### 1.1.1 Les systèmes MRP2

Le MRP2 est défini par l'APICS comme une méthode de planification efficace de toutes les ressources d'une entreprise industrielle. Les systèmes MRP2 fournissent une multitude de services dont les plus utilisés sont sûrement les plannings opérationnels, les plans financiers et surtout l'aide à la décision par l'analyse de scénarios. Ce type de système est constitué de cinq niveaux de planification, à savoir : plan stratégique (PS), plan industriel et commercial (PIC), programme directeur de production (PDP), calcul de besoins nets (ou MRP1), planification de besoins en capacité et systèmes de suivi de l'exécution des plans matières et des capacités. Les données résultantes sont intégrées dans des états valorisés tels que le plan d'entreprise, l'engagement des dépenses d'achat, le budget d'expédition et la valorisation prévisionnelle des stocks. Les différentes fonctions incluses dans un système MRP2 sont montrées dans la figure 1.1 (d'après Thomas (2004)).

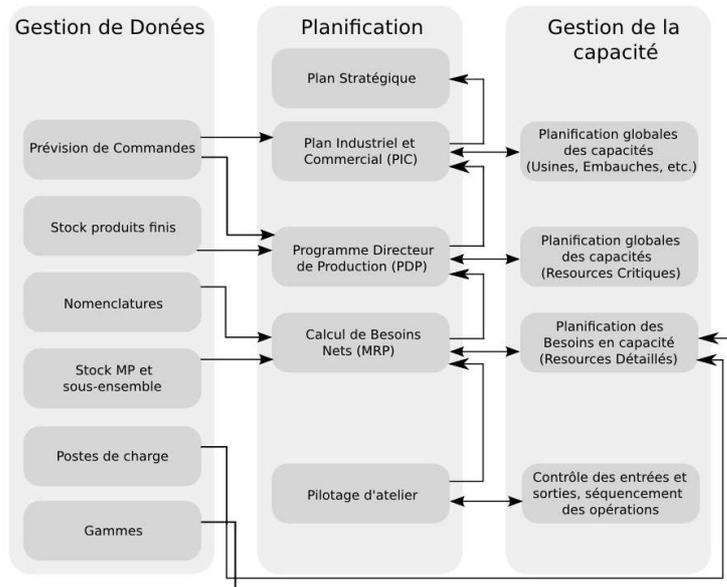


FIGURE 1.1 – Le système MRP2

Un point important dans le système MRP2 et dans la planification de la production est la différence des horizons de planification selon les niveaux de décisions. Ces horizons peuvent être classés en des horizons à long termes (années, semestres), à moyen termes (trimestres, mois ou semaines), à court-termes (jours) et très court termes (heures ou minutes). Au regard de ces différents horizons de planification, il est possible d'identifier quatre niveaux de décisions, ces niveaux sont : le niveau stratégique, le niveau tactique, le niveau opérationnel et le niveau contrôle ou exécution. La Figure 1.2 montre les différents niveaux de décision.

Par la suite, on décrira les problèmes et les variables de décision les plus courants pour chaque niveau.

### Niveau Stratégique

Au niveau stratégique, les problèmes concernent les décisions au plus haut niveau de l'entreprise, en définissant les indicateurs pour matérialiser les objectifs généraux. Les décisions les plus courantes à ce niveau sont :

- ⇒ La capacité globale des sites de production.
- ⇒ L'introduction de nouveaux produits.
- ⇒ L'utilisation de nouvelles technologies.
- ⇒ Les décisions de lancement de nouvelles gammes.
- ⇒ La définition des indicateurs et standards de la chaîne logistique.

D'autres décisions sont aussi prises à ce niveau : la localisation optimale des sites, l'attribution des activités à ces sites, le nombre de sites actifs, le choix des alternatives de transport, etc (Genin 2003). Les décisions à ce niveau sont axées sur le long-terme et peuvent être basées sur des indicateurs et des méthodes quantitatifs ou qualitatifs. Toutes

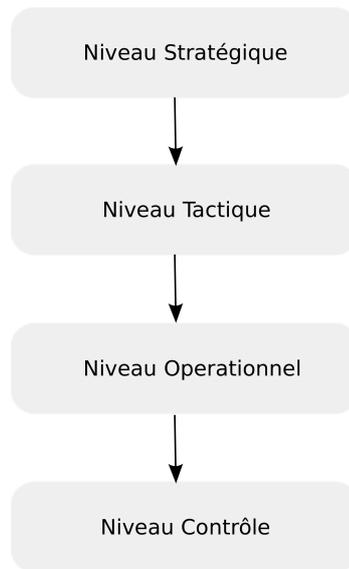


FIGURE 1.2 – Niveaux de décision

ces décisions donnent un cadre pour les décisions de niveau tactique. L'information à ce niveau vient principalement de sources externes et les décisions ont un caractère clairement financier. Les principaux problèmes suscités à ce niveau seront d'ordre macroscopique, c'est-à-dire suscités par des considérations de politique nationale et internationale, par des changements du marché financier, des conditions liées à la concurrence, et aux changements technologiques, etc. Une fois les décisions prises à ce niveau, il est nécessaire de s'assurer du respect des objectifs globaux au niveau inférieur à savoir le niveau tactique. L'outil le plus important à ce niveau est le Plan Stratégique nommé aussi Plan d'Entreprise (PE). Ce plan est caractérisé par des décisions à long terme (plus de deux ans) et l'information nécessaire à son établissement provient principalement de variables externes au système industriel. L'idée est d'envisager les principales problématiques provenant de l'environnement socio-économique pour assurer la correcte adéquation des actions face aux objectifs globaux de l'entreprise, comme nous l'avons déjà mis en évidence.

### Niveau Tactique

À ce niveau, les décisions ont un horizon de moyen-terme et sont basées le plus souvent sur des indicateurs et méthodes de nature quantitative. Les décisions sont relatives aux productions à réaliser et sont :

- ➔ Les volumes et périodes de production en fonction de la répartition de la demande et des alternatives de production.
- ➔ L'utilisation des capacités.
- ➔ Les coûts et immobilisations stockées.
- ➔ L'adéquation des ressources aux besoins de production.
- ➔ La qualité de service en terme, entre autre, de dates de livraison.

En général, les décisions les plus importantes concerneront la détermination des volumes de production pour satisfaire les besoins des clients, en cherchant l'optimisation

des ressources. L'importance du niveau tactique réside principalement dans l'objectif de dimensionner le système industriel et de matérialiser efficacement les décisions prises au niveau stratégique. Dans un contexte MRP2, les deux plans principaux qui se développent à ce niveau sont le PIC et le PDP. Ces décisions impactent directement l'accomplissement des objectifs globaux et l'optimisation des ressources de l'entreprise.

**Plan Industriel et Commercial (PIC) :** le PIC permet de mettre en œuvre les objectifs stratégiques établis par le management lors du Plan d'Entreprise (PE). Il représente le lien entre la planification des ventes et de la production. Le PIC est entièrement intégré au système d'information commercial et de gestion de la demande. Il permet ainsi la mise en œuvre des différents Programmes Directeurs de Production. Le PIC a un rôle de réflexion prospective et de dimensionnement portant sur le moyen terme.

**Programme Directeur de Production (PDP) :** le PDP est le lien entre la planification tactique et le niveau opérationnel. Il s'appuie sur les prévisions de vente de produits finis et sur les propositions de production issues du PIC (Thomas, Genin & Lamouri 2008). Pour cela, le PDP prend en compte les disponibilités des ressources critiques ainsi que les politiques de gestion. Le résultat essentiel du PDP est un ensemble de quantités de production de produits finis à fabriquer par période, déterminées de façon à minimiser les coûts de production et à maximiser les taux d'utilisation des goulots. De plus, le PDP est un outil important pour assurer un bon taux de service client et l'efficacité du système de production en considérant les contraintes de capacité.

### Niveau Opérationnel

A ce niveau, l'objectif est de piloter les activités et leur mise en œuvre pour atteindre les objectifs de volume fixés au niveau précédent. Ce niveau de contrôle assure la flexibilité quotidienne nécessaire pour réagir aux aléas du court-terme. Il s'agit donc d'un niveau de planification décentralisée qui détermine l'ordre dans lequel chaque activité doit être réalisée dans le cadre des décisions fixées au niveau tactique (Genin 2003).

Les principales activités concernées par le pilotage de la production à ce niveau sont les activités de la *classe ordonnancement*. On fait référence à la *classe ordonnancement* parce qu'il existe plusieurs types d'ordonnancement dont les facteurs sont le séquençement des tâches, l'affectation des tâches aux machines, etc, avec pour objectif, généralement, de minimiser le temps de cycle de la production. Pour ce niveau, on s'intéresse aux problèmes suivants :

- ⇒ Ordonnements de type flow-shop.
- ⇒ Ordonnements de type job-shop.
- ⇒ Ordonnements hybrides flow-shop et job-shop.
- ⇒ Lotissement et séquençement (lot-streaming problems).
- ⇒ Équilibrage de lignes de production.
- ⇒ Configuration de lignes d'usinage.
- ⇒ Etc..

À ce niveau les problèmes sont souvent traités hors-ligne.

**Ordonnancement :** l'ordonnancement consiste à déterminer les séquences d'opérations à réaliser sur les différentes machines de l'atelier en considérant des contraintes de précedence, de disponibilité ou de temps (Artigues 2004). Cette planification des tâches a comme objectif principal l'optimisation de l'utilisation des ressources et la réduction du temps de production global. Dans la pratique industrielle, l'objectif de cette planification est souvent de trouver des solutions ajustées aux contraintes qui permettent d'obtenir des solutions réalisables dans des cadres de temps acceptables (Armetta 2006). Cette réduction en termes d'objectifs est induite par la complexité des systèmes de production et quand elles sont considérées, par des perturbations comme : les pannes de machines, la non-uniformité des opérations, les contraintes physiques, les contraintes ergonomiques, les facteurs humains, etc. (Falkenauer 2005).

### Niveau Contrôle ou Exécution

Ce niveau fait référence aux décisions de plus bas niveau. Il comprend les interactions entre les produits et les machines en termes de changements d'outils ou d'affectation de tâches sur un robot. De fait, il est aussi nommé *Contrôle de la production en temps réel* (Real-time manufacturing control). À ce niveau, les activités sont liées à d'importantes contraintes de temps et correspondent à l'affectation des tâches aux machines de manière à suivre la réalisation des décisions des opérateurs et/ou des machines sur un produit (Mařík & McFarlane 2005). L'horizon de décision est très court, c'est-à-dire de l'ordre de quelques minutes, voir même de quelques secondes. La programmation de tâches est faite le plus souvent par l'intermédiaire des API.

Les décisions à ce niveau ont un caractère crucial pour un atelier de production puisque des erreurs à ce niveau peuvent générer des retards ou blocages complets des lignes de production. Ainsi, d'importantes pertes économiques peuvent être mesurées suite à des dommages causés aux machines (Mařík & McFarlane 2005). C'est pour répondre à ces enjeux que d'importantes efforts de recherche et de développement ont été fournis. Ainsi, ce niveau de décision a intéressé beaucoup de chercheurs et est à l'origine des approches provenant du paradigme IMS et, par exemple, par les Systèmes Holoniques de Production.

Cette classification en quatre niveaux de décision permet de mieux analyser les principales contributions trouvées dans la littérature. En effet, elle permet, d'une part, de structurer l'analyse bibliographique, et d'autre part, de mieux situer l'application et le cadre générique proposé dans ces travaux de thèse.

Par la suite, on abordera la dichotomie entre les décisions centralisées et distribuées, en s'appuyant sur les principales propositions qui ont été faites jusqu'à nos jours. On fera, de plus et de façon récurrente, référence à ces quatre niveaux de décision définis dans cette section afin de mieux situer la problématique qui nous intéresse dans cette thèse.

**Horizons de décision :** un autre aspect important de cette hiérarchisation de prise de décision est relatif au concept d'horizon glissant. Dans un système MRP2, les décisions prises à un niveau supérieur, sont souvent considérées comme des contraintes à respecter aux niveaux inférieurs. Face à la différence temporelle des horizons de planification et aux changements dans les pronostics ou dans les paramètres, il est nécessaire de mettre

en œuvre des méthodes qui peuvent gérer ces problèmes. C'est pourquoi, les plans aux différents niveaux sont recalculés avec une périodicité déterminée à chaque niveau. Par exemple, dans les systèmes MRP2, il est usuel que le PIC soit recalculé à une périodicité mensuelle et le PDP à une périodicité hebdomadaire. La figure 1.3 montre comment se développe ce procédé :

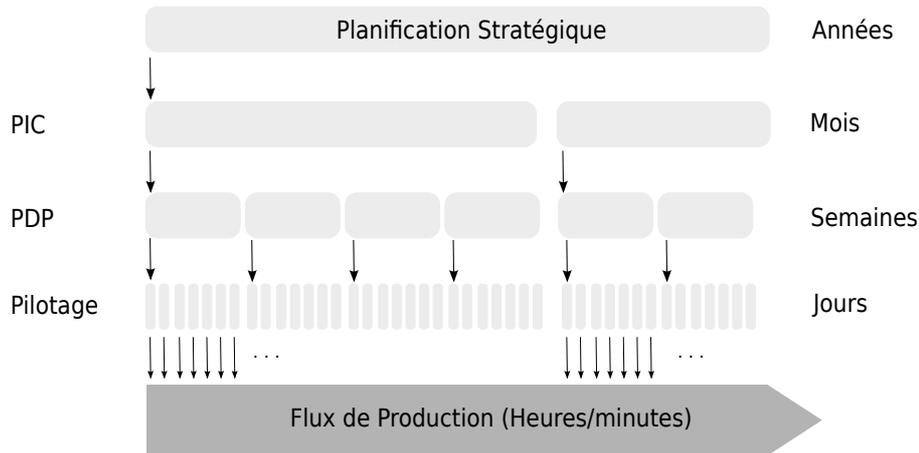


FIGURE 1.3 – Prises de décision hiérarchisées

Au début des années quatre-vingt, la plupart des entreprises en Amérique du Nord et en Europe faisaient usage de systèmes MRP2. Cependant, de nouvelles philosophies de gestion sont apparues à cette époque engendrant des changements radicaux dans la gestion de la production. Ainsi, ces changements ont été principalement portés par la philosophie du *juste à temps* (JiT) et par la théorie des contraintes.

### 1.1.2 Les systèmes JiT

Entre le milieu des années soixante-dix et le début des années quatre-vingt, les industries nord-américaine et européenne se sont trouvées fortement menacées par la concurrence japonaise. Ces nouvelles entreprises proposaient au consommateur des produits de haute qualité à des coûts très compétitifs. Ainsi des marques comme Sony ou Panasonic sont devenues, par exemple, en matière d'appareils électroménagers, des synonymes de haute qualité et de fiabilité. Le secret de ce succès était une philosophie de production qui se basait sur un effort de réduction permanente des gaspillages et sur l'amélioration continue de la qualité. L'idée principale de cette philosophie de gestion est basée sur l'utilisation efficace des ressources productives, telles que la main-d'œuvre, les matières premières et les machines. Cette philosophie sera mondialement connue sous le nom de *Just in Time* (JiT) et postérieurement s'est déclinée en diverses approches comme *lean manufacturing* (Krafcik 1988), *Demand Flow Technology* (Costanza 1996), *Six Sigma* (Tennant 2001), etc...

Au niveau des ateliers de production, l'outil principal de cette philosophie pour le pilotage des flux physiques est la méthode Kanban. Cette méthode, en utilisant un système de cartes, change le système de production MRP2 de type poussé et basé sur une stratégie

de *make-to-stock* - pour un système de type tiré. Dans ce dernier, la consommation des produits intermédiaires nécessaires pour un processus, déclenche son remplacement par le processus précédent. Par cette démarche, on remplace uniquement la matière consommée par le processus suivant. De cette façon, l'idée est de produire uniquement quand un ordre est généré évitant ainsi de générer des stocks, comme dans les systèmes de type MRP2 lorsqu'on utilise des stratégies de lots économiques.

Bien que la philosophie *lean* ait commencé à se développer dans les années 50 (dans les ateliers de Toyota), il faudra attendre les années quatre-vingt pour qu'elle commence à être étudiée et mise en place dans les entreprises occidentales. Ainsi, les entreprises nord-américaines et européennes commencent à intégrer graduellement différentes techniques comprises dans cette nouvelle philosophie de production, en constituant nécessairement des systèmes hybrides de type MRPII/JiT. Citons quelques avantages de cette approche :

- ➡ Une plus grande flexibilité au niveau des ateliers de production.
- ➡ Une réduction des stocks, spécialement les en-cours.
- ➡ Une gestion simplifiée des opérations.
- ➡ L'amélioration continue de la qualité.

D'autres bénéfices, généralement, sont aussi associés à ces systèmes, parmi eux : la réduction des coûts, la réduction des temps de production, un meilleur taux de service client ou encore plus d'innovation. Tous ces bénéfices sont soumis au degré d'expertise des équipes impliquées dans la gestion et la mise en œuvre des opérations.

Certains considèrent comme contrainte importante des techniques basées sur la philosophie *lean manufacturing*, l'important travail de formation et de motivation qui doit être fait pour l'adopter comme une véritable *philosophie* de gestion. Cette philosophie ne doit pas seulement être partagée par tout le personnel de l'entreprise, mais aussi par les autres acteurs de la chaîne logistique, ou au moins par les fournisseurs et les clients directs.

Pour autant, la philosophie *lean manufacturing* et surtout la méthode Kanban, ont provoqué une grande révolution dans la gestion de la production. Le changement principal consiste dans le fait que cette fonction n'est plus conçue d'une façon hiérarchique et centralisée comme elle l'était dans les systèmes MRP2. Ainsi, les décisions au niveau du flux de production commencent à se faire de manière plus distribuée, en obtenant de bons résultats principalement en ce qui concerne la réduction des niveaux de stocks de matières premières, d'en-cours et de produits finis. Malgré cet enthousiasme initial pour la décentralisation des décisions, l'apparition de la *théorie des contraintes* proposera un point de vue différent et complémentaire de cette conception décentralisée du système, par la recherche d'un optimum global. Ce qui a constitué un retour à la voie centralisée.

### 1.1.3 La Théorie des Contraintes ou le management par les contraintes

La troisième grande philosophie de gestion de la production, sera proposée à partir du travail précurseur de Eliyahu M. Goldratt et de Cox, présenté dans leur livre *The Goal* (Le but) en 1984 initialement nommé OPT (Optimized Production Technology, du fait du progiciel proposé) et qui par la suite sera nommé *Théorie des Contraintes* (Goldratt et al. 1992). Cette nouvelle philosophie de gestion de la production propose aux

responsables du processus de production de changer leurs perspectives, pour se concentrer sur l'identification des contraintes qui empêchent l'entreprise d'atteindre ses *buts* et de se concentrer, en termes d'optimisation, sur l'utilisation du (des) goulot(s).

Ce qui est sous-jacent à la Théorie des Contraintes (TOC) réside dans le fait que l'évolution des organisations peut être mesurée et contrôlée par les changements de trois indicateurs : produit financier généré par les ventes, frais opérationnels et matières premières. Le premier est l'argent généré par les ventes. Les matières premières sont l'argent que le système investit pour permettre la vente de ses biens et services. Les frais opérationnels correspondent à l'argent que le système dépense pour transformer les matières premières en produits finis. Pour la planification et le pilotage de la production, comme nous l'avons introduit précédemment, l'outil principal de la Théorie des Contraintes est le logiciel *Optimized Production Technology* (OPT).

OPT est un logiciel très performant dont la caractéristique la plus importante consiste à mettre l'accent sur l'utilisation méticuleuse et optimale des ressources critiques que constituent les *goulots* du système (personnes, machines ou services) dans les opérations. Le système OPT reconnaît que la gestion des goulots est la clé pour obtenir le succès, là où la production totale du système peut être maximisée et les stocks peuvent être réduits. Cependant, ce traitement de l'information nécessite de revenir à une centralisation des décisions.

Le développement de ces trois philosophies de gestion de la production a, bien sur, provoqué l'apparition de beaucoup de systèmes *hybrides* qui utilisent des techniques provenant indistinctement de MRP2, JiT ou TOC.

L'une de ces hybridations les plus courantes est le fait d'utiliser des systèmes MRP2 pour tout ce qui est gestion de l'information jusqu'au niveau du PDP et d'utiliser la méthode kanban (ou des dérivés de celles-ci) pour le pilotage du flux de production, (El Haouzi 2008, Klein 2008). On trouve actuellement plusieurs autres hybridations entre MRP2, JiT et TOC dans l'industrie. À la fin des années quatre-vingt dix, d'autres systèmes supports commencent à prendre de l'importance dans la gestion de la production, ceux-ci sont les systèmes ERP (Enterprise Resource Planning), les systèmes SCM (Supply Chain Management) et les systèmes APS.

#### 1.1.4 Les ERP

Bien que le concept d'ERP commence à se développer au début des années quatre-vingt, ce n'est qu'à la fin de cette décennie qu'ils se répandent plus largement dans le milieu industriel. La figure ci-après montre un diagramme conceptuel des systèmes ERP.

Basés sur les fondations technologiques du MRP2, les ERP intègrent des *processus d'affaires* en incluant la fabrication, la distribution, la comptabilité, la gestion des ressources humaines, les finances, la gestion de projets, la gestion de stocks, la maintenance et le transport, et en octroyant l'accessibilité et la visibilité des différentes activités de l'entreprise. Les avantages communément promus par les entreprises qui développent des systèmes ERP sont :

1. Permettre l'accès à des informations fiables (base de données commune, consolidation des données et amélioration des rapports).

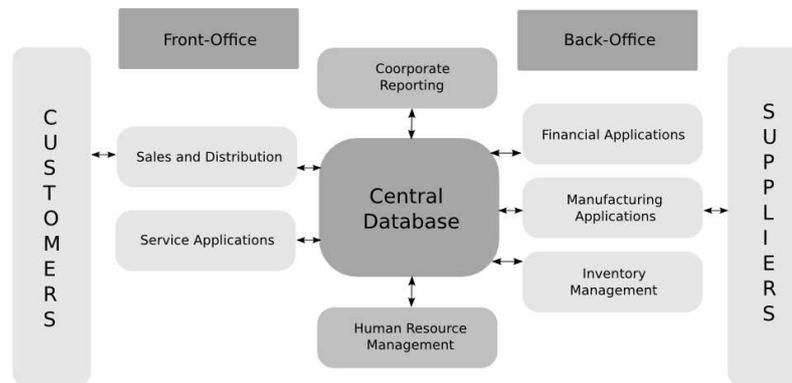


FIGURE 1.4 – Le concept de système ERP

2. Éviter la redondance d'opérations et de données (les modules accèdent aux mêmes données dans la base centrale).
3. Éviter les multiples opérations de mise à jour et d'entrée des données.
4. Proposer des fonctions de commerce électronique (commerce par Internet et culture de collaboration).
5. Proposer des modules additionnels tels que Gestion de la Relation Client (CRM) et SCM.

D'autres avantages ont souvent été promus comme : la réduction des temps de cycle et de livraison, la réduction des coûts, l'adaptabilité et le facteur d'échelle, mais ils sont encore discutables à ce jour. Par ailleurs, les inconvénients plus habituellement constatés de ces systèmes sont : le temps dépensé pour l'implémentation, le coût du système et l'engagement avec le vendeur, l'adaptabilité organisationnelle nécessaire aux composants du système et surtout la rigidité de celui-ci à l'égard de la complexité des différents processus de l'entreprise. Malgré ces contraintes, les systèmes ERP s'imposent actuellement au niveau mondial comme des systèmes très utilisés par les entreprises. Le pronostic de revenus pour les vendeurs de systèmes ERP pour 2011 est de 47.7 milliards de dollars avec un taux de croissance autour de 10% par an (Jacobson et al. 2007).

### La chaîne logistique et ses systèmes de gestion

Par ailleurs, la complexité croissante des opérations et le besoin d'une gestion efficace des relations entre les entreprises et leur environnement, fournisseurs et clients principalement, font émerger le concept de *Chaîne Logistique* au début des années quatre-vingt-dix. En accord avec l'APICS, la Chaîne Logistique peut être définie comme un réseau global de livraison de produits et services depuis les matières premières jusqu'aux clients finaux à travers un flux élaboré d'informations, un flux physique et un flux financier.

Les fonctions destinées à la gestion d'un système de ce type sont communément regroupées sous le nom de Gestion de la Chaîne Logistique. Cette fonction est définie par l'APICS comme la conception, planification, exécution, pilotage et suivi des activités de la chaîne logistique pour créer de la valeur, développer un réseau de distribution concurrentiel, déployer une logistique internationale, synchroniser l'offre et la demande et mesurer

les performances globales. Les activités plus communément trouvées dans la plupart des chaînes logistiques sont montrées dans la figure 1.5 (Stadler & Kilger 2002) :

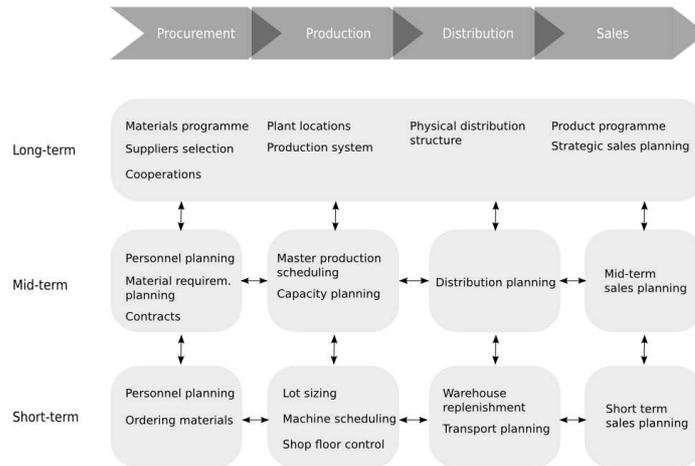


FIGURE 1.5 – La matrice de planification de la chaîne logistique

### 1.1.5 Les systèmes de planification avancée

Les faiblesses des systèmes MRP2 et les avancements en termes de supports informatiques (partie hardware) et de capacité de calcul du début des années quatre-vingt dix, motivent le développement de nouveaux systèmes de planification de la production : les APS (Advanced Planning and Scheduling ou Advanced Planning Systems). Ces nouveaux systèmes de planification trouvent leurs origines dans la Planification Hiérarchique de la Production, en anglais, Hierarchical Production Planning (HPP), développée à partir du début des années quatre-vingt (Bitran & Hax 1977, Hax 1977).

L'idée inhérente aux APS est l'utilisation des techniques et des algorithmes qui permettent d'obtenir des solutions optimisées à différents niveaux de décision. Ces systèmes ont été définis par l'APICS comme des techniques qui rentrent dans le cadre de l'analyse et de la planification de la production et de la logistique à court, moyen et long termes. Le terme APS désigne tout programme informatique qui utilise des algorithmes, ou la logique mathématique, pour optimiser ou simuler un ordonnancement à capacité finie, un approvisionnement, un planning financier, un planning de ressources, une prévision, une analyse de gestion de la demande, etc. Ces techniques font simultanément intervenir un jeu de contraintes et de règles commerciales pour fournir des plannings et des programmes d'ordonnancement en temps réel, des aides à la décision et le disponible à la vente (produit ou capacité). Souvent, l'APS crée et évalue plusieurs scénarios, l'utilisateur choisissant l'un d'eux comme *plan de référence*. Les cinq composantes principales d'un système APS sont la planification de la production, l'ordonnancement de la production et la planification de la distribution et du transport. La structure générale d'un système APS est montrée dans la figure 1.6 (Stadler & Kilger 2002) :

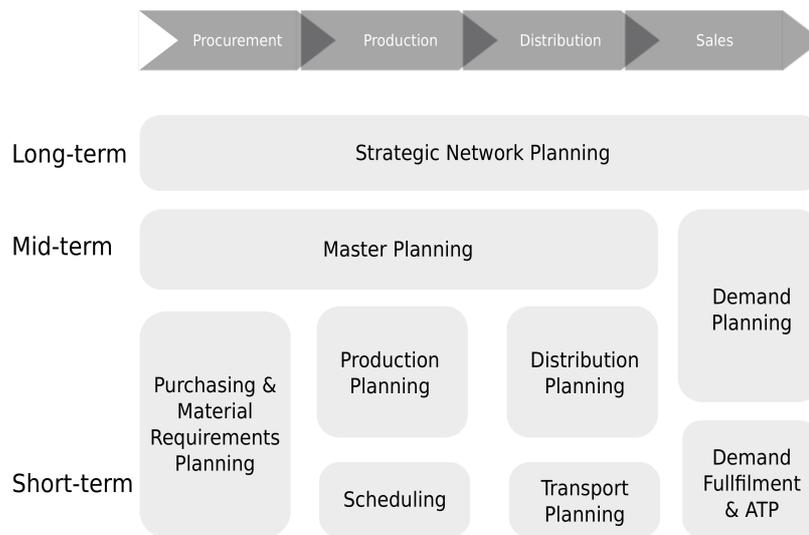


FIGURE 1.6 – Modules de logiciels qui supportent la chaîne logistique

Conformément à (Genin 2003), les APS, au regard des systèmes MRP2, permettent la possibilité de réaliser et de traiter des agrégations de produits en familles. Ceci peut se faire au niveau de la planification tactique comme dans la logique PIC d'un MRP classique. Cependant, ils permettent aussi de se séparer de cette obligation et à ce niveau de rester axés sur les ressources critiques du système. Ainsi, les APS offrent la possibilité d'une structure de planification intégrée (multi-niveaux, multi-horizons, etc.) et cohérente (Ortiz 2005). Malgré les importantes avancées en termes d'optimisation dans les décisions des activités de planification obtenues par les APS, d'autres problématiques subsistent, notamment celles liées à la flexibilité, la reconfigurabilité, la robustesse, l'agilité, la réactivité ou la réutilisation. En effet, ces problèmes sont encore loin d'être résolus par ce genre de systèmes en raison de la complexité engendrée. Nous allons donc énoncer ci-après quelques faiblesses provenant des systèmes APS.

### 1.1.6 Analyse critique des approches centralisées

#### Structure fortement hiérarchisée

Les systèmes APS ont été développés à partir de la planification de la production hiérarchique (HPP). Dans la HPP, les décisions de planification sont désagrégées à partir d'un modèle central qui considère des paramètres et des variables à long terme. Aux différents niveaux de désagrégation, les nouvelles décisions prises deviennent des objectifs pour les niveaux inférieurs. Dans cette logique, il n'existe pas un vrai retour d'informations depuis les niveaux inférieurs, ce qui ne permet pas une haute réactivité et une grande flexibilité vis-à-vis des changements possibles.

#### Agrégation de l'information

L'information nécessaire pour l'obtention des décisions aux différents niveaux est une information *agrégée*, ainsi la nature combinatoire des problèmes abordés comporte une

réduction de la complexité (modèles simplifiés) et une idéalisation des différentes situations (hypothèses). Dans ce processus d'agrégation, d'importantes relations entre les différents composants du système peuvent donc être négligées.

### Réductionnisme

Comme on l'a énoncé auparavant, la nature combinatoire de la plupart des problèmes dans les systèmes de production, tels que le problème d'allocation de ressources, conduit à la simplification de la complexité inhérente à ce genre de systèmes. Dans les travaux de (Valckenaers et al. 2007) plusieurs de ces simplifications faites habituellement sont nommées. Ces travaux font référence principalement au niveau d'ordonnancement, mais il y a aussi des points qui peuvent être extrapolés à d'autres niveaux du processus de planification et de pilotage.

- ⇒ Certaines activités industrielles ne seront pas modélisées.
- ⇒ Quelques activités industrielles ne sont modélisées que très grossièrement.
- ⇒ Les modèles peuvent ne pas représenter des incertitudes inhérentes au processus.

## 1.2 Les Systèmes Intelligents de Production

Comme conséquence du développement des systèmes pour la gestion de la production, à la fin des années quatre-vingt, le concept de production intégrée par ordinateur « Computer Integrated Manufacturing (CIM) » (Waldner 1992) se renforce. Ce système, qui a été déjà conçu pendant les années soixante-dix, a pour objectif général l'interconnexion de l'ensemble des systèmes d'information inclus dans les systèmes de production. Ces systèmes d'information sont les systèmes consacrés à des fonctions de dessin (CAD), d'ingénierie (CAE), de fabrication (CAM), d'analyse de procédés (CAPP), de contrôle de la qualité (CAQ), et de planification (MRP2). Ainsi, les systèmes CIM ont pour objectif de fournir la surveillance et le contrôle de toutes les opérations de l'entreprise.

Au niveau du hardware, les systèmes CIM font usage des machines à commande numérique (CNC), des API, des robots, ordinateurs, logiciels, régulateurs, réseaux, interfaces et transstockeurs, (ASRS), chariots autoguidés (AGV's) et convoyeurs automatisés (ACS's) entre autres. Le paradigme, régnant pendant cette époque et qui a été en incubation pendant quelques décennies auparavant, est que ce type de systèmes intégrés serait capable d'avoir une grande flexibilité face aux changements et aussi, de façon générale, pourrait fournir de meilleures solutions face aux problèmes qui se poseront au niveau du système de production.

Dans la plupart des implémentations des systèmes CIM, on a pu assurer que la structure organisationnelle et les procédés de l'entreprise seraient automatiquement améliorés (Warnecke 1993). En réalité, à l'échelle d'une entreprise, on peut affirmer que l'implémentation des systèmes CIM a conduit à des systèmes rigides et centralisés qui n'étaient pas capables de donner des réponses rapides aux changements. Pour autant, un certain

nombre d'ateliers flexibles se sont avérés être très productifs. En conséquence, au début des années quatre-vingt dix, les systèmes CIM ne seront plus vus comme la solution à tous les problèmes des entreprises de production (Babiceanu & Chen 2006).

Au vu de ces résultats peu encourageants en termes de flexibilité et de réactivité, obtenus par les systèmes fortement intégrés, au début des années quatre-vingt dix, une série d'initiatives conjointes entre centres de recherche, universités et entreprises ont vu le jour autour d'un objectif commun *Concevoir et développer les systèmes de production de l'avenir*. Dans ce cadre, une des plus importantes initiatives a été l'Intelligent Manufacturing Systems Project (Yoshikawa 1995). Les idées de base d'IMS sont la conception et l'implémentation de systèmes décentralisés (basés sur leurs prédécesseurs CIM) dont l'objectif est d'être hautement flexibles pour répondre rapidement aux perturbations propres aux processus de production. Ces nouveaux systèmes sont orientés vers la satisfaction des besoins en termes de robustesse, reconfigurabilité et de réutilisation (Leitão 2009). Conformément à (Shen et al. 2006), la prochaine génération de systèmes industriels sera ainsi fortement asservie à l'évolution du temps (ou hautement réactive), toujours en se préoccupant des coûts et de la qualité. De tels systèmes industriels devront permettre :

1. L'intégration totale de logiciels hétérogènes et des systèmes de hardware dans une entreprise, une entreprise virtuelle, ou à travers la chaîne logistique.
2. L'architecture ouverte permettant de disposer de nouveaux sous-systèmes (logiciels ou hardware) ou de ne plus prendre en compte des sous-systèmes existants *en ligne*.
3. La communication efficiente et efficace et une coopération entre des départements dans une entreprise et entre des entreprises.
4. L'incorporation de facteurs humains dans des systèmes industriels.
5. La réponse rapide à des changements d'ordre externe et des perturbations inattendues provenant de l'environnement industriel interne et externe.
6. La tolérance aux défauts, autant au niveau du système qu'au niveau des sous-systèmes, pour récupérer les sources des défauts et pour minimiser son impact dans la production.

Parmi les éléments centraux sur lesquels s'est appuyée cette nouvelle conception de systèmes de production, on trouve les systèmes multi-agents provenant de l'intelligence artificielle (Wooldridge & Jennings 1995). Un autre élément important qui a provoqué l'adoption de cette vision décentralisée des systèmes de production, a été l'évolution de la *programmation structurée* à la *programmation orientée objets* dans les années quatre-vingt. Ces changements conduisent à une conception des systèmes de production de plus en plus décentralisée. Conformément à ce critère, les systèmes de production sont classés en quatre types de base (Babiceanu & Chen 2006) : les systèmes centralisés, hiérarchiques, hiérarchiques modifiés et les systèmes hétérarchiques. Autour de la conception

des systèmes décentralisés, vont apparaître différents types de systèmes et de concepts; les principaux seront les systèmes de production bioniques, fractals et holoniques.

### 1.2.1 Les systèmes bioniques

Les systèmes bioniques de production ont été proposés par (Ueda 1992). La théorie de base sous-jacente à ces systèmes est issue de la *synthèse émergente* (Ueda 2001), dont l'objet est la composition de la structure et l'organisation de systèmes complexes à partir de composants simples. Répondre à la question de : « comment ce processus peut être défini ? », notamment quand l'information du système et l'environnement n'est que partielle, est le cœur de la recherche dans ce domaine. Cette approche a été proposée pour émuler la propriété d'adaptabilité vis-à-vis des changements de l'environnement. Elle est présente chez les êtres vivants et est réalisée par les fonctions de *self-recognition/auto-reconnaissance*, *self-growth/auto-croissance*, *self-recovery/auto-rétablissement* et l'évolution elle-même (Ueda 2007).

### 1.2.2 Les systèmes fractals

Les systèmes fractals ont été proposés à partir des travaux de (Warnecke 1993). Ces systèmes font usage du concept de *fractal* développé par Benoît Mandelbrot en 1974. Ces systèmes utilisent les propriétés de l'auto-similarité et de la récursivité présente dans la géométrie fractale, pour la conception d'une structure du système composé par des entités à des différents niveaux de la même structure et en assurant la cohérence entre les objectifs globaux et locaux. L'objectif est de doter la structure du système de production de la flexibilité nécessaire pour faire face aux changements de l'environnement (Tharumarajah 1996).

### 1.2.3 Les systèmes holoniques

À partir des concepts exprimés par Alfred Koestler dans son livre *The ghost in the Machine* dans 1967 (Koestler 1968), le *HMS consortium* a proposé les systèmes holoniques de production. Ces systèmes sont basés sur le concept de *holon* qui est une entité pouvant être contenue dans d'autres holons (Van Brussel et al. 1998). Les holons sont organisés dans des *holarchies* et montrent des propriétés comme l'autonomie et la coopération. Ce paradigme a pour objectif principal le fait que la structure du système préserve sa hiérarchie et qu'elle conserve une flexibilité dynamique au niveau hétérarchique.

La comparaison entre le concept d'agent et le concept de holon est assez fréquente. Ainsi, plusieurs auteurs utilisent indistinctement les deux concepts sans faire une claire différence entre eux. Bien qu'un holon peut être conçu comme un agent, la principale différence est que dans un holon *la partie contrôle n'est pas séparée de la partie physique* (Fir 1998). *Tandis que dans le cas d'un agent, (qui est une entité abstraite) une entité physique peut être confondue ou représentée par une entité abstraite.*

### 1.2.4 Systèmes contrôlés par le produit

Un *système contrôlé par le produit* fait évoluer la vision précédente vers un système plus interopérable et intelligent, en définissant le produit comme *le contrôleur* des ressources des entreprises industrielles (Morel et al. 2003). Cela mène à la conception d'un *produit intelligent*. Celui-ci a été défini comme une entité avec une représentation physique et informationnelle, capable d'influencer des décisions qui peuvent l'affecter lui-même (McFarlane et al. 2003, Meyer et al. 2009). Dans une perspective pratique, l'identification par radio-fréquence (RFID) a été largement acceptée comme une technologie capable de lier l'information avec l'environnement physique (Vrba et al. 2008, Thomas, Castagna, Blanc, Cardin, El Haouzi, Klein & Pannequin 2008). L'idée fondamentale est le changement de perspective depuis une vision classique hiérarchique et agrégée de la fonction de planification et de pilotage de la production vers une perspective distribuée de la prise de décision, dans laquelle, une partie de la décision est réalisée de façon locale et tout au long du cycle de vie des produits. Ainsi, l'information nécessaire est réduite et traitée de manière plus locale. Les systèmes contrôlés par le produit ont été généralement conçus comme une classe particulière des systèmes holoniques.

### 1.2.5 Analyse critique des approches IMS

#### Faisabilité

Dans certains cas, la prise de décision distribuée basée sur des agents est la seule solution automatisée réalisable. Par exemple, dans les scénarios des chaînes logistiques où les entreprises rivalisent avec les autres et où les informations partagées sont rares pour des raisons de sécurité, les agents fourniront probablement une stratégie plus systématique et automatisée pour remplacer les pratiques ad-hoc existantes.

#### Robustesse et flexibilité

Cet avantage peut améliorer la performance pour une large gamme de circonstances et elle est l'argument clé pour justifier l'utilisation des systèmes à base d'agents. Spécifiquement, cela signifie que le système a comme propriétés : la robustesse aux pannes ou aux perturbations des plans, la réorganisation en ligne et une réponse effective aux perturbations externes.

#### Reconfigurabilité

Les solutions basées sur des agents soutiennent fortement une approche *plug and play*. Cela permet de changer, ajouter ou enlever, autant le matériel que les modules de logiciel, en ligne à chaque fois que cela est nécessaire. Cela rend aussi la maintenance du système significativement moins chère. Ce changement est la conséquence des échecs d'équipement ou la conséquence d'un changement de plan. La migration depuis l'ancienne technologie peut évoluer lentement sans arrêter l'opération.

## Réutilisation

La même philosophie basée sur les agents peut s'opérer à différents niveaux dans différents sous-systèmes de l'entreprise. La recherche jusqu'à aujourd'hui de ces concepts peut être classée (Mařík & McFarlane 2005) en trois niveaux qui sont : (1) Contrôle de la production en ligne, (2) Gestion de la production et (3) Coordination des entreprises virtuelles.

Par ailleurs, les IMS se considèrent comme les successeurs des systèmes CIM, puisqu'ils partagent un grand pourcentage de technologies et de sous-systèmes. Par contre, il existe d'importantes différences principalement au niveau de l'organisation et des objectifs. Le changement d'une vision centralisée à une vision décentralisée, amène nécessairement un changement dans la conception de la structure et l'organisation des systèmes de production. C'est ce qui a amené au développement de nouvelles architectures informatiques, dispositifs, logiciels, outils de simulation, processus, méthodologies, protocoles, standards, algorithmes, etc.

Malgré les avancées dans chacun de ces aspects, les implémentations industrielles de ce type de systèmes et l'acceptation par l'industrie de ce changement de paradigme, n'ont pas encore été très nombreuses, contrairement aux systèmes conventionnels de pilotage (Valckenaers et al. 2007, Trentesaux 2007). Quelques implémentations réussies de ce nouveau type de systèmes se trouvent dans (Pechoucek et al. 2007, Pro 2001, Covanich & McFarlane 2009), mais il reste encore beaucoup de questions ouvertes (Mařík & Lažanský 2007, Morel et al. 2007). Les principaux problèmes résiduels sont :

## Modélisation

Jusqu'à maintenant, de nombreuses méthodologies ont été proposées pour la modélisation d'approches distribuées (PROSA, ADACOR, METAMORFH, etc.). Malgré cela, il n'existe pas encore de critères standardisés pour réaliser la modélisation. Ainsi, on peut constater que la modélisation peut être conduite en se focalisant sur les aspects fonctionnels, physiques ou abstraits (Créput 2008). Pourtant, le choix d'outils, critères et modèles reste fortement liés aux préférences et compétences de chaque concepteur. Ce manque d'uniformité rend très difficile l'évaluation par comparaison des différentes applications proposées dans la littérature. De plus, ce manque de standardisation contraste fortement avec les formalismes mathématiques utilisés dans les approches traditionnelles telles que la modélisation mathématique.

## Optimisation

Un des points les plus critiques concernant les approches hétérarchiques (décentralisées) par rapport aux approches traditionnelles (centralisées) est celui de l'optimisation des décisions. Contrairement aux approches conventionnelles, les systèmes hétérarchiques sont encore incapables de garantir formellement leur performance en termes de variables quantifiables et notamment de coûts. Les systèmes hétérarchiques, en plus des critères classiques de coût, temps et efficacité, s'intéressent à des objectifs autour de la flexibilité, la re-configurabilité, la réactivité, l'interopérabilité, etc. Ceux-ci ne sont pas facilement

quantifiables au sens classique ce qui rend difficile la comparaison et l'évaluation des apports de tels systèmes.

## Benchmarking

L'outil le plus utilisé pour la validation des systèmes décentralisés est la simulation. La méthode la plus généralement adoptée consiste à construire un modèle du système et ensuite de comparer le résultat généré par celui-ci avec la situation réelle et à l'évaluer par rapport à différents critères de performances. Le principal problème avec cette méthode d'évaluation est qu'il est très spécifique au système et aux problématiques abordées, ce qui ne permet pas une comparaison plus générique avec d'autres approches. Pour résoudre cette question, divers travaux ont exprimé la nécessité de proposer un ensemble de problèmes et de cas d'études industrielles qui permettent la comparaison entre les approches (Valckenaers et al. 2006).

Pour finir ce tour d'horizon de ces problématiques autour des systèmes hétérarchiques de planification et de pilotage, notons que l'on observe pour ces derniers un déficit concernant l'étude de nombreux problèmes pourtant largement traités dans le cadre des systèmes conventionnels. Ces problèmes proviennent surtout de la pratique industrielle. Parmi eux, nous pouvons nommer des problèmes comme l'effet de vague, la nervosité au niveau de PDP, le lissage de la production, etc. Quelques travaux ont été développés dans ce sens (Hadeli et al. 2006), mais ils sont encore très insuffisants. À notre avis, la recherche concernant ces problèmes peut être avantageuse car elle peut ouvrir de nouvelles perspectives autour des problèmes classiques. Ces problèmes ont fait l'objet de bon nombre de travaux de recherche par les voies classiques centralisées, alors que la recherche dans le domaine d'IMS permettrait sûrement d'apporter des éléments novateurs.

## 1.3 Problématique générale

On peut conclure à la suite de l'analyse précédemment exposée que ces deux grandes approches de la planification et du contrôle de la production, présentent des forces et des faiblesses. En résumé, actuellement, les approches conventionnelles dites centralisées, permettent d'assurer l'efficacité de tout le système, mais au détriment de la flexibilité et de la réactivité. À l'opposé, les approches provenant du paradigme IMS, dites distribuées, permettent de hautes flexibilité et réactivité, mais sans aucune garantie de performance ni de cohérence entre les décisions prises aux différents niveaux. Ainsi, la recherche de la cohérence globale du fonctionnement d'un système à travers les comportements élémentaires et ses objectifs propres est primordiale (Thomas 2004).

Aussi, une réponse possible est de concevoir des systèmes hybrides centralisés/distribués, qui permettent d'assurer une marge d'efficacité acceptable et une cohérence entre les différents niveaux de décision, en permettant au système de réagir de façon rapide aux perturbations externes ou internes, c'est-à-dire, en conservant une haute flexibilité et de la réactivité. Ainsi, l'objectif général de ces travaux de thèse est de proposer un cadre générique de modélisation pour cette classe de systèmes dits hybrides. En particulier, la partie distribuée de nos travaux sera abordée dans la perspective des systèmes contrôlés

par le produit.

Dans le prochain chapitre, on exposera l'analyse de la bibliographie concernant les systèmes hybrides centralisés/distribués et l'état de l'art des systèmes contrôlés par le produit. Cette analyse permettra de définir les objectifs spécifiques de ces travaux de thèse au regard de l'état de développement actuel dans ce domaine.

## **1.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, notre objectif a été de montrer de façon générale l'évolution des systèmes de planification et de pilotage de la production. Cette analyse permet de mieux comprendre le contexte de ces travaux de thèse mais également d'identifier les idées à l'origine de nos travaux. Comme on a pu l'observer au cours du chapitre, la planification et le pilotage de la production moderne ont été développés au cours des soixante dernières années, les plaçant ainsi comme une thématique assez récente avec un fort impact industriel et sociétal.

On a pu constater que l'évolution des systèmes centralisés intégrant de plus en plus de fonctionnalités a permis d'aller vers le paradigme CIM. Plus tard, au cours des années quatre-vingt le concept de Juste-à-Temps a conduit à un changement de vision en faisant émerger de nouveaux paradigmes de gestion dûs essentiellement à l'augmentation de la concurrence et aux premiers effets de la mondialisation. De ce fait, l'économie globale et la réduction des cycles de vie des produits créent de nouveaux besoins dans les entreprises, en termes de temps de réponse et d'adaptabilité. Ils vont faire évoluer les systèmes conventionnels de planification et de pilotage de la production vers plus de distribution de la prise de décision. Néanmoins, il reste encore de nombreuses problématiques et défis à aborder, notamment ceux qui sont relatifs à l'efficacité, la cohérence globale, la flexibilité et l'adaptabilité.

L'objectif de ces travaux de thèse est l'exploration de nouveaux chemins vers l'intégration de ces objectifs, en proposant comme solution, la conception de systèmes hybrides dans un contexte industriel fortement perturbé. Ainsi, nous proposons un système de gestion hybride centralisé/distribué pour la planification et le pilotage de la production. Le système proposé a comme objectif principal de concaténer ces approches pour donner au système la flexibilité nécessaire pour une adaptation rapide aux perturbations internes ou externes, mais aussi, pour assurer que cette adaptation respecte les décisions de moyen terme, les décisions du niveau tactique.

# Chapitre 2

## Systemes hybrides centralisés/distribués

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Systèmes hybrides ERP - JiT</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Systèmes hybrides holoniques et basés sur des agents</b>	<b>24</b>
2.2.1	YAMS	25
2.2.2	AARIA	26
2.2.3	METAMORPH	26
2.2.4	PROSA	27
2.2.5	InteRRaP	29
2.2.6	ExplanTech	30
2.2.7	ADACOR	31
2.2.8	Pabadis Promise	33
2.2.9	Autres approches	34
<b>2.3</b>	<b>Systèmes contrôlés par le produit</b>	<b>34</b>
<b>2.4</b>	<b>Conclusion et objectifs spécifiques des travaux de thèse</b>	<b>40</b>

---

Nous avons vu que le système de planification et de pilotage de la production est le composant le plus important de l'infrastructure qui supporte les processus industriels. Celui-ci devra être configuré en fonction de l'environnement spécifique de l'entreprise (Vollman et al. 1997). Dans ce système, la fonction de planification et de pilotage est l'élément clé d'une bonne gestion des opérations (Sridharan & Kanet 1995). Une approche centralisée de cette fonction considérerait les problèmes de planification et de pilotage comme des problèmes d'optimisation et de contrôle d'un système dynamique à grande échelle (Villa 1989). Dans cette perspective, l'optimisation et le contrôle sont réalisés grâce à la formulation de modèles pour les différents sous-problèmes. Comme il a été exprimé dans les sections précédentes, cette désagrégation en sous-problèmes, et surtout leur traitement individuel, amène de la rigidité dans l'organisation, laquelle provoque à son tour une perte considérable de flexibilité et de réactivité.

Par conséquent, notre proposition consiste en un système hybride centralisé/distribué de planification et de pilotage de la production basé sur le concept de contrôle par le produit. L'objectif est de donner au système la flexibilité nécessaire pour obtenir une réponse rapide à des perturbations internes et externes, tout en restant cohérent avec les décisions à moyen terme.

Le concept d'hybridation centralisé/distribué n'est pas nouveau. En effet, dès le début de la mondialisation, dans les années 80, les entreprises ont cherché à induire de la réactivité et réduire les délais de production en donnant des possibilités de décisions aux opérateurs. Cette première forme de *système mixte* sauvegardait les fonctionnalités du système MRP2 tout en déléguant une partie des décisions au niveau le plus bas du système de pilotage. Dans notre cas et comme nous l'avons vu, nous avons défini quatre niveaux de décision, qui sont : le niveau stratégique, le niveau tactique, le niveau opérationnel et le niveau de contrôle ou d'exécution.

Dans ce contexte, ces niveaux de décision ont été traditionnellement définis de différentes façons selon le type d'orientation du travail développé et le niveau de détail désiré. Ce chapitre veut faire l'état de l'art des manières dont ces fonctions ont été implémentées dans divers types de systèmes hybrides.

La suite du chapitre est organisée de la manière suivante. La section 2.1 montre la première interprétation des systèmes hybrides correspondant aux systèmes de type ERP couplés avec des organisations de pilotage en JiT (ou Lean Manufacturing). La section 2.2 décrira les systèmes hybrides qui utilisent les paradigmes holoniques et multi-agents. Cette section se concentrera sur la description de cadres génériques de modélisation. La section 2.3 montrera le développement actuel du paradigme de contrôle par le produit. Finalement, la section 2.4 exprime la conclusion et définit les objectifs spécifiques des travaux de thèse en s'appuyant sur l'analyse de la littérature.

## 2.1 Systèmes hybrides ERP - JiT

Un des premiers types d'hybridation des processus de décision (centralisées/distribuées) fut le couplage des systèmes de planification MRP2 avec des systèmes de pilotage de type kanban. Celle-ci se retrouve dans une grande partie des systèmes de production actuels. Elle permet d'assurer une cohérence des activités de production avec les objectifs globaux de l'entreprise, permettant ainsi une flexibilité au niveau de l'atelier. Parmi les premiers travaux à citer, on trouve les travaux de Karmarkar (1986). Les principaux problèmes qui ont été identifiés dans les approches centralisées sont :

- ⇒ La gestion de l'information, à savoir : l'entrée des données, la communication et la maintenance des informations,. Les coûts sont en fonction de la complexité du système et des incertitudes internes ou externes.
- ⇒ La représentation centralisée du système n'est pas appropriée : le fait que la dynamique du système ne soit pas prise en compte conduit à une augmentation des en-cours et des coûts relatifs à la qualité de service.

- ➡ La non-existence des incitations : contrairement aux systèmes Kanbans, dans les systèmes centraux il n'y pas d'incitations ; par exemple, pour réduire les délais.
- ➡ L'inhabilité à gérer des contingences : les systèmes centraux, généralement, n'implémentent pas des méthodes pour faire face aux perturbations et provoquent un comportement nerveux.

Par ailleurs, les principaux problèmes présentés concernant les méthodes distribuées basées sur la méthode Kanban sont :

- ➡ Le coût d'opportunité liée à l'incapacité de profiter de l'information relative à de nouvelles demandes.
- ➡ Les coûts induits par la myopie au niveau du système de production.
- ➡ La rigidité du routage dans la configuration de cellules de production.

Sur la base de leurs faiblesses respectives précédemment citées, il est possible d'entrevoir les premiers intérêts de l'hybridation des systèmes de décision. Notons aussi que cette hybridation découle du besoin de cohérence et de flexibilité des entreprises. Bien que cette première tentative d'hybridation permette d'obtenir des améliorations en termes de cohésion et de flexibilité, il est possible d'identifier encore certaines faiblesses et problèmes. Dans les travaux de Klein (2008) une problématique industrielle provenant d'un système hybride ERP/Kanban pour le pilotage de la production dans une entreprise manufacturière a mis en évidence les faiblesses suivantes :

- ➡ Le processus décisionnel n'assure pas l'optimalité : cette faiblesse est assez évidente étant donné la complexité du problème d'ordonnancement, mais, le verrou scientifique derrière cette faiblesse réside dans le fait que la plupart de ces systèmes n'ont pas de coordination entre les différents niveaux de décision. Par exemple, les décideurs de terrain n'ont pas une vision globale de la situation pour permettre d'évaluer leurs décisions. Cette problématique est fortement liée au fait qu'au cours des différentes étapes de production les objectifs seront divergents, ainsi, une solution satisfaisant à un objectif local a de grande chance de dégrader un critère global.
- ➡ L'organisation hiérarchique crée de l'inertie : le manque d'information du contexte global crée des délais supplémentaires dans les décisions et même des blocages dans les flux de production.

Pour résoudre ces problèmes, ces travaux proposent un système de kanban actif dans lequel, en utilisant des technologies RFID, les Kanbans embarquent des informations pour améliorer les décisions distribuées. Ainsi, le kanban actif peut déclencher des événements lorsqu'une opération est terminée, en évaluant un possible changement dans les ordres, plutôt qu'en respectant l'ordre imposé par les tableaux kanban.

## 2.2 Systèmes hybrides holoniques et basés sur des agents

Les systèmes de planification et de pilotage de la production holoniques basés sur des agents, ont fait l'objet d'importantes recherches au cours des vingt dernières années. La recherche s'est plus concentrée sur les niveaux contrôle et opérationnel. Au niveau du contrôle, on peut trouver des travaux qui abordent des thématiques comme la reconfiguration des systèmes (Barata et al. 2008, Chokshi & McFarlane 2008), la coopération et la négociation (Faratin et al. 1998, Maturana et al. 2006), l'auto-organisation et l'émergence (Sluga et al. 2001). Au niveau opérationnel, l'accent a été mis sur le développement des approches qui abordent des activités conventionnelles comme la génération de gamme (Rais et al. 2002), la coordination entre la génération de gamme et l'ordonnancement (Sugimura et al. 2003, Sugimura et al. 2007, Wang & Lin 2009), les problèmes d'ordonnancement (Murthy et al. 1997, Bongaerts et al. 1997, Valckenaers et al. 2007, Leitão & Restivo 2008) et le développement de systèmes MES (Blanc et al. 2008, Simão et al. 2006, Verstraete et al. 2008). Des autres travaux se sont développés pour faire des liens entre ces deux niveaux précédents, telles que les approches pour les systèmes MES qui prennent en compte des tâches d'ordonnancement de bas niveau. D'autres tentatives d'hybridation à un plus haut niveau ont été faites (PDP/CBN). Il s'agissait de lier partiellement ces niveaux aux activités distribuées de bas niveau avec cependant les particularités suivantes :

- ⇒ La plupart de ces travaux ne considèrent pas l'activité de planification avec un horizon de décision au moins égal au plus long délai cumulé comme il est défini dans les « bonnes pratiques » (Vollman et al. 1997). Ils ont été développés pour des systèmes de production de type make-to-order (Lima et al. 2006), pour lesquels le problème est posé lorsqu'un nouvel ordre de production arrive. Dans ce cas, la proposition consiste à réajuster la planification (Nigro et al. 2003) ou l'ordonnancement pour s'adapter à cette nouvelle situation.
  
- ⇒ Une grande partie des travaux se situe dans un contexte où la planification au niveau du PDP est faite par un système de type ERP (Watanabe et al. 1991, Wunsch & Bratukhin 2007). Alors, la planification considérée correspond plutôt à des activités opérationnelles qu'à des activités de planification tactiques (Frey et al. 2003, Pechoucek et al. 2007).

Au niveau stratégique, les approches holoniques et multiagents ont été utilisées dans le cadre des « entreprises virtuelles ». Une entreprise virtuelle peut être définie comme un ensemble d'entreprises qui est formée avec l'objectif d'exploiter des avantages mutuels pour augmenter l'efficacité de leurs activités logistiques (Hardwick & Bolton 1997). Alors, ces entreprises virtuelles chercheront principalement à partager et exploiter de l'information pour mieux coordonner les activités entre les participants (Monteiro et al. 2007).

La modélisation et la mise en œuvre des systèmes hybrides, a besoin d'un cadre de modélisation et d'implémentation qui permette la définition des composants et de leurs relations. C'est pourquoi, par la suite, nous décrirons les principaux travaux autour de la conception, la modélisation et l'implémentation des systèmes holoniques et des systèmes à base des agents, en portant un intérêt particulier aux approches dédiées aux systèmes

de production.

### 2.2.1 YAMS

YAMS (Yet another manufacturing system) (Van Dyke Parunak et al. 1986, Van Dyke Parunak 1987, Van Dyke Parunak 1994) est une des premières architectures avec une conception hybride du système de décision. Les décisions considérées sont relatives au nombre de composants à produire et à la génération des gammes. L'objectif principal est de « transférer l'intelligence au plus proche du point d'application », étant donné qu'un réseau d'ordinateurs en parallèle peut grandement accélérer les calculs en comparaison avec une approche centralisée. Cette architecture fut conçue pour des systèmes flexibles de production (SFP), et bien que l'architecture proposée soit fortement hiérarchique, la prise de décision est restée hybride, c'est-à-dire centralisée au plus haut niveau et coopérative à des niveaux plus bas. La figure 2.1 (d'après Van Dyke Parunak et al. (1986)) montre un diagramme du flux de données dans cette architecture.

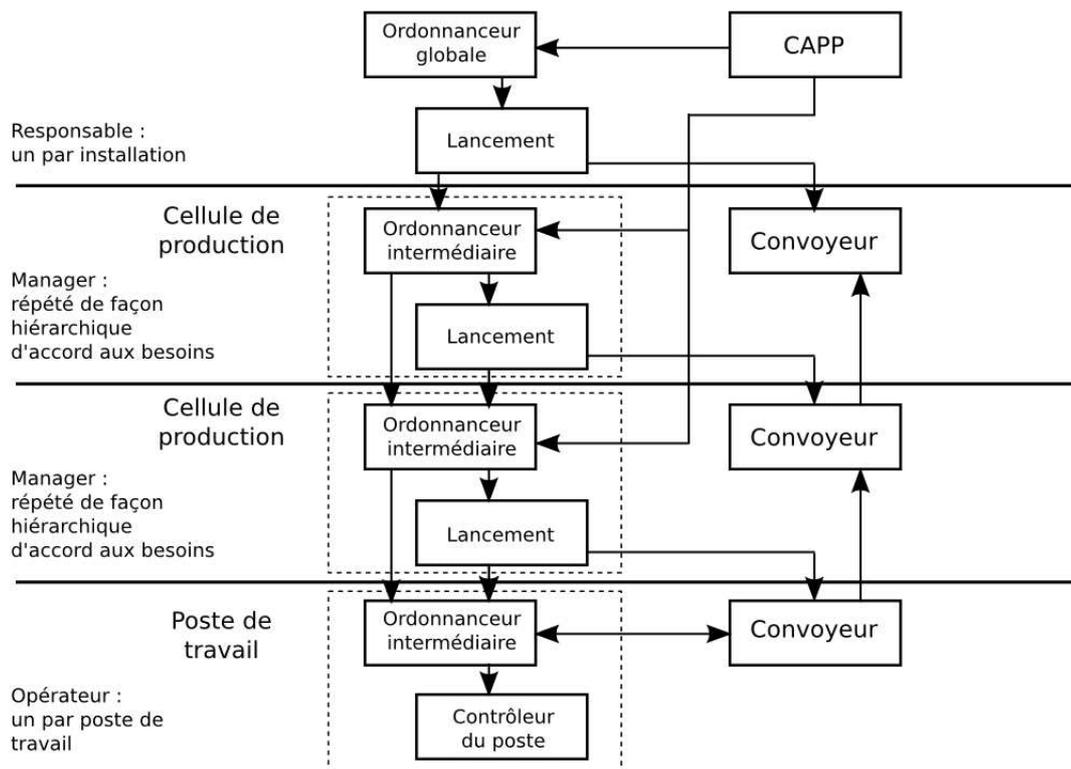


FIGURE 2.1 – YAMS

L'idée principale est *d'ordonnancer de façon hiérarchique*, c'est-à-dire d'obtenir, au niveau le plus haut, un ordonnancement général avec de larges fenêtres de temps et de raffiner cet ordonnancement au fur et à mesure que l'on descend dans la structure. De cette manière, le système cherche à diminuer l'effet de myopie de la partie distribuée. Dans cette partie distribuée, le flux de production est contrôlé par un mécanisme basé

sur le kanban. D'ailleurs, les décisions sont prises par la coordination entre les différents niveaux d'ordonnancement. Il faut noter que YAMS ne considère pas le niveau tactique, c'est-à-dire que l'entrée du système est constituée de quantités produits à produire dans la période, généralement une semaine (PDP).

### 2.2.2 AARIA

L'architecture AARIA (Autonomous Agents for Rock Island Arsenal) (Van Dyke Parunak et al. 1997, Van Dyke Parunak 1998) est une architecture pour un système de production à base d'agents pour les niveaux opérationnels (ordonnancement) et d'exécution. En utilisant cette architecture dans un contexte de chaîne logistique, chaque entreprise sera vue comme des agents représentant des « clients » ou des « fournisseurs » selon l'interprétation des processus. Ainsi, le fonctionnement du système global est basé sur une approche de marché, dans laquelle les acteurs interagissent afin d'établir des accords « commerciaux » pour réaliser leurs activités. De plus, les agents seront classés en deux groupes : les « agents persistants » et les agents « transitoires ». Les agents persistants (ressources, processus) correspondent aux agents dont le comportement reste inchangé dans l'horizon de temps considéré (voir figure 2.2 d'après Van Dyke Parunak et al. (1997)). A l'inverse, les agents transitoires changeront leur état en fonction des étapes de leur cycle de vie. Ceux-ci correspondent aux produits, matériaux, composants, engagements (contrats), etc. Alors, les agents persistants fonctionneront comme des courtiers qui « inter-changent » des agents transitoires pour faire aboutir les demandes des clients.

Cette architecture est différente de celle de YAMS, puisque les agents ne sont pas organisés de façon hiérarchique et qu'il n'y a pas de division temporelle des niveaux de décision. Ce changement est possible parce que cette architecture est orientée principalement vers les décisions de court terme et a pour objectif de servir de cadre à l'exécution et à l'ordonnancement réactif.

### 2.2.3 METAMORPH

L'architecture METAMORPH a été définie comme une architecture multi-agents adaptative pour des systèmes de production. Cette approche est basée sur des agents médiateurs, c'est-à-dire, des agents qui gèrent la communication entre groupes d'agents. Les agents y sont organisés en fédérations d'agents (Maturana et al. 1999) et possèdent des capacités délibératives, ces sont donc des agents cognitifs. Bien que l'approche utilise ce type d'agents, il en existe deux classes : les agents ressources et les agents médiateurs (voir figure 2.3 d'après Van Dyke Parunak et al. (1986)). Les agents ressources représentent les dispositifs et opérations. Ils auront ainsi des caractéristiques telles que l'autonomie et la coopération. Les agents médiateurs auront en plus une capacité d'apprentissage à partir des activités internes et externes du système. Ces derniers sont utilisés pour coordonner les interactions entre les agents ressources. Les agents ressources sont organisés sous la forme de « clusters » qui se forment et évoluent de façon dynamique en fonction de la nature et des besoins des problèmes abordés. Cette caractéristique dynamique de formation de

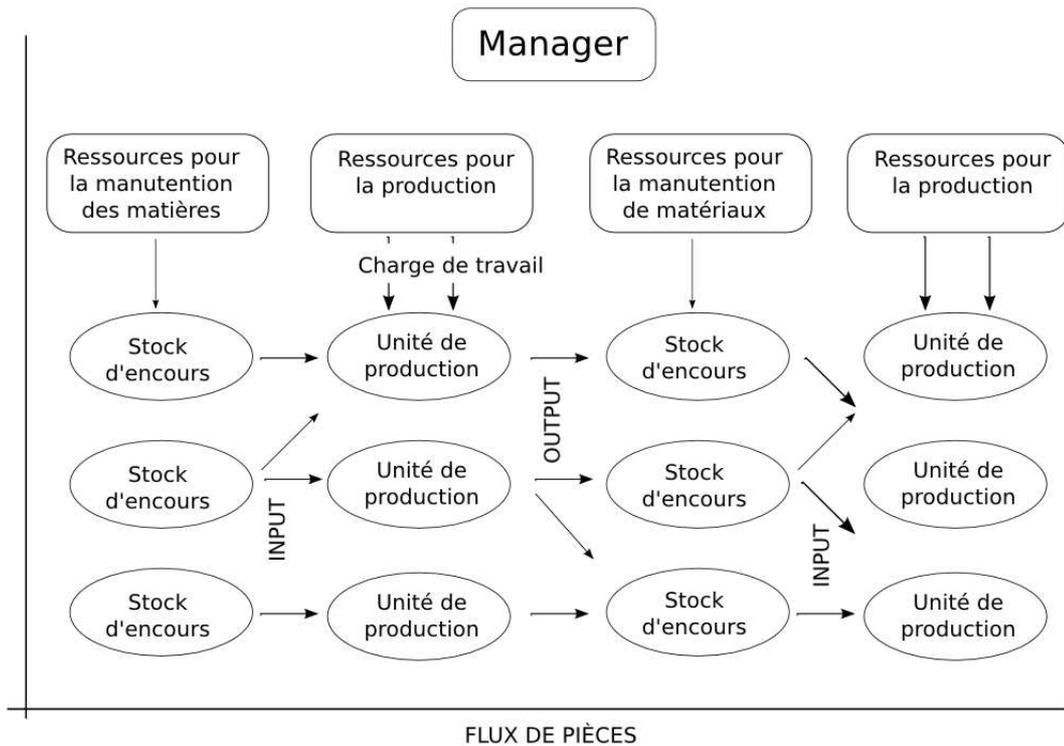


FIGURE 2.2 – Communauté des agents du AARIA

« clusters » conduit à une haute flexibilité dans l'organisation des agents en permettant une constante évolution du système, en octroyant une grande adaptabilité à différentes situations.

Un des points en commun avec AARIA est que cette approche a été conçue pour servir au pilotage de chaînes logistiques, en s'appuyant sur quatre concepts qui sont : l'entreprise virtuelle, les systèmes intelligents distribués, l'ingénierie concurrente et l'architecture des agents. Bien que cette architecture a été proposée pour aborder différents niveaux de décision (planification, ordonnancement et contrôle des flux), les travaux ne présentent pas une description du comment traiter les problèmes de planification et leurs horizons temporels respectifs. Au contraire, les niveaux d'ordonnancements réactifs et de contrôle sont plutôt bien détaillés. Ainsi, on peut classer ce système au niveau opérationnel et contrôle de la même façon que l'architecture AARIA.

## 2.2.4 PROSA

L'architecture PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture) (Van Brussel et al. 1998) est une architecture pour la modélisation et l'implémentation d'un système de production holonique. Ainsi, PROSA définit trois types de base d'holons : l'holon ordre, l'holon produit et l'holon ressource. De plus, il est possible de définir des holons staff qui permettent de définir des procédures de décision ou de connaissance. L'ensemble des

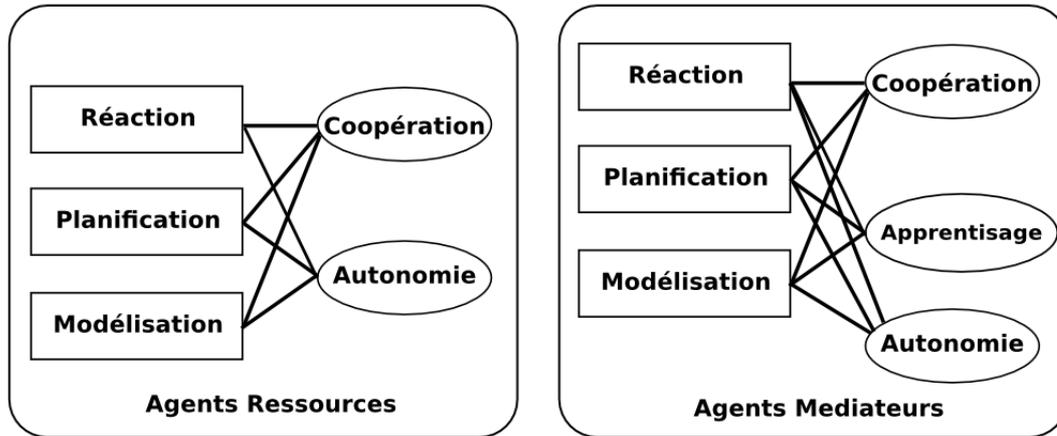


FIGURE 2.3 – Caractéristiques de base des agents dans METAMORPH

holons est organisé en une holarchie pour réaliser les activités de production. Un des apports importants de PROSA, étant basé sur des holons, est l'intégration du système de production avec le système de contrôle, c'est-à-dire, qu'il n'existe pas de séparation entre la partie physique et la partie informationnelle. Dans la figure 2.4 (d'après Van Brussel et al. (1998)), on montre la relation entre les trois holons de base.

De façon similaire à AARIA, l'organisation de l'holarchie de PROSA est réalisée par la formation de groupes d'holons qui forment des agrégats d'holons de manière dynamique en fonction des activités spécifiques à réaliser. Par ailleurs, les holons peuvent être des holons spécialisés pour la fonction qu'ils doivent accomplir ou en fonction de caractéristiques spécifiques : produits qui appartiennent à une famille de produits, machines avec des fonctions similaires, ordres de production avec des gammes similaires, etc..

PROSA permet de gérer aussi le degré d'autonomie/contrôle dans le système de production. Cette fonctionnalité est implémentée par les agents staff. Un agent staff est un agent qui peut contenir des algorithmes centralisés pour obtenir des solutions. Ces algorithmes n'altèrent pas la nature hétérarchique de l'architecture, parce que les solutions obtenues sont utilisées plutôt comme informations pour aider aux processus décisionnels et non comme des ordres stricts. Cette construction de la relation hiérarchie/hétérarchie est une interprétation intermédiaire des approches conventionnelles hiérarchiques et des approches hybrides. Ce principe a été aussi exprimé dans la proposition d'AARIA, dans laquelle les auteurs considèrent comme un point crucial le fait que ces approches peuvent

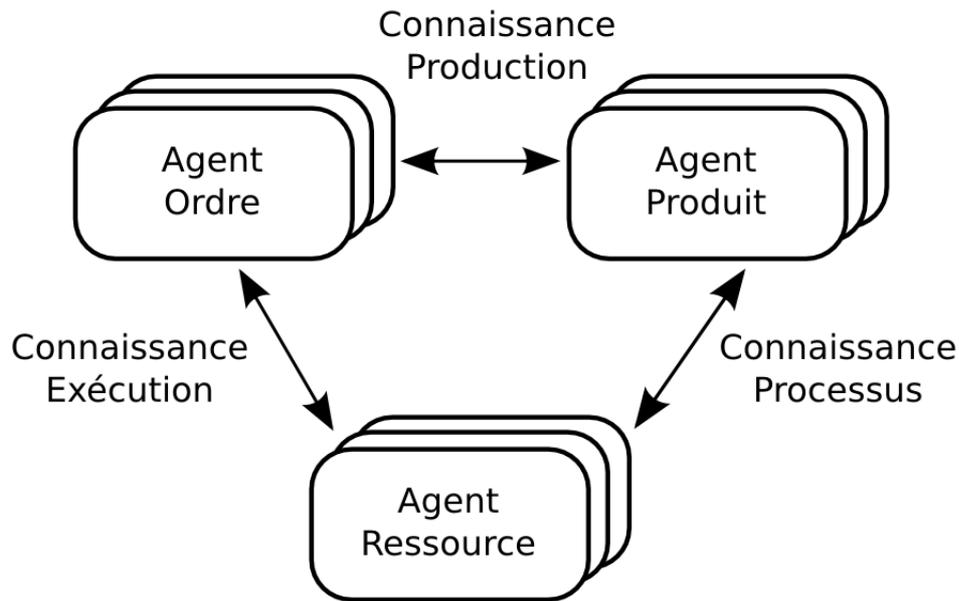


FIGURE 2.4 – Blocs de construction de base dans PROSA

être intégrées de façon assez naturelle aux approches conventionnelles. Ce point-là sera un des points primordiaux à considérer dans notre proposition.

Un autre point important qui rend intéressante la vision de PROSA pour nos travaux, est l'interprétation du produit comme une entité active dans le processus de production. Celle-ci est largement répandue dans les travaux traitant des produits intelligents (Gouyon 2004, Pannequin 2007). Malgré cette vision intégrant le produit, celui-ci n'est pas considéré réellement comme une entité active, dans la plupart des applications de PROSA que l'on peut trouver dans la littérature. La solution majoritairement répandue consiste à transférer l'intelligence dans un « monde virtuel » plutôt qu'à la laisser réellement sur le produit. En considérant les applications qui ont utilisé PROSA comme cadre de modélisation pour des systèmes holoniques, il est possible de constater que la plupart des applications concernent le niveau opérationnel et celui de contrôle, et ce plus spécifiquement dans le cadre de modélisation et d'implémentation de systèmes MES.

### 2.2.5 InteRRaP

L'idée de base d'InteRRaP (Fischer et al. 1994, Fischer 1999) est de définir un agent par un ensemble de couches fonctionnelles liées par une structure de contrôle basée sur la communication. Cette architecture est basée sur des agents sociaux qui utilisent le modèle BDI (Belief, Desires and Intentions) (Wooldridge 2000). InteRRaP a été proposée pour des Systèmes Flexibles de Production (SFP). Les couches fonctionnelles correspondent

aux trois activités de base que les agents doivent réaliser dans un SFP. Ces activités sont la coordination, la résolution des problèmes locaux et l'exécution des plans. La figure 2.5 (d'après Fischer et al. (1994)) montre l'architecture des agents dans InteRRaP.

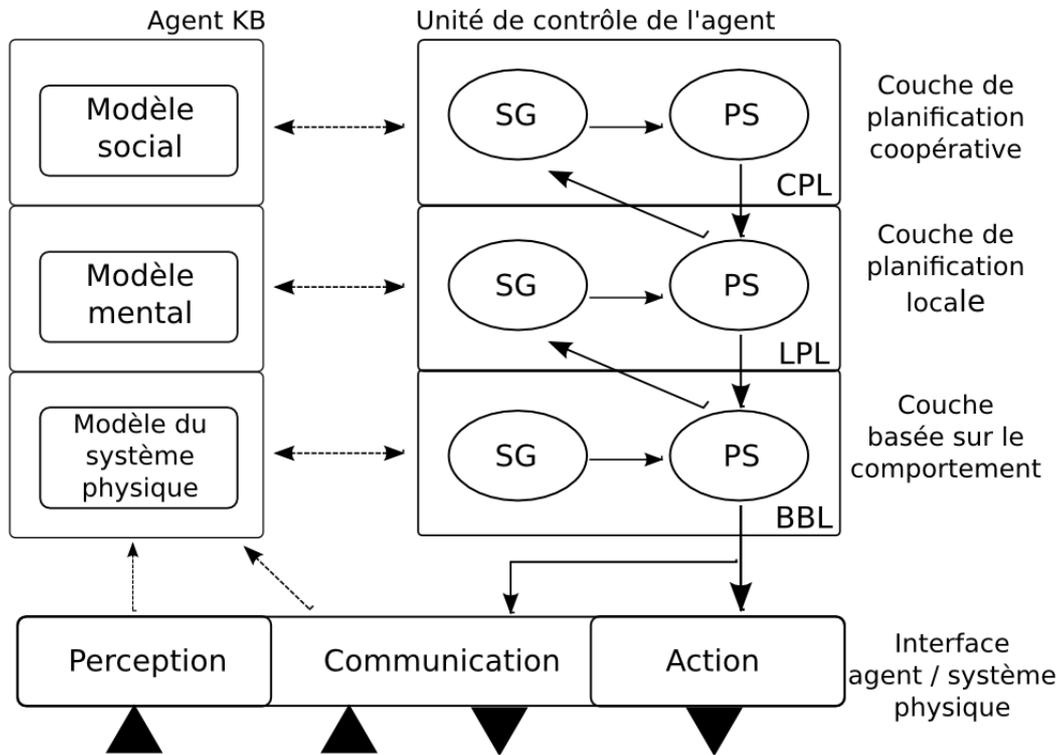


FIGURE 2.5 – Architecture d'un agent en InteRRaP

Cette architecture considère la planification et le pilotage comme le niveau le plus haut dans la hiérarchie décisionnelle. Ceux-ci étant implémentés de façon *hors ligne* sans la possibilité d'une modification a posteriori.

### 2.2.6 ExplanTech

ExPlanTech est une technologie basée sur des agents pour la planification et le pilotage de la production (Pechoucek et al. 2002, Pechoucek et al. 2007). Cette technologie est créée sur la base ProPlanT (Marik et al. 2000). L'architecture ProPlanT est développée comme un système multi-agents dans des entreprises qui travaillent en mode projets. Ainsi, ExplanTech correspond à une généralisation de ProPlanT à des entreprises de production de masse. Le système travaille en utilisant une communauté d'agents autonomes qui représentent des entités d'information ou de production. L'une des caractéristiques centrales de cette technologie réside dans le fait qu'aucun mécanisme centralisé de décision n'est utilisé.

De façon plus détaillée, ProPlanT utilise deux classes d'agents : les agents intra-entreprise (IAE) et les agents inter-entreprises (IEE). Aussi, les agents d'administration

de la production (PMA) sont responsables de la réalisation de la production en interagissant avec des agents de production. Les agents de production mettent en application des méthodes d'ordonnancement en parallèle pour résoudre les problèmes d'affectation de ressources. Parmi les agents IEE, se trouvent les agents clients qui représentent les clients de l'entreprise. D'autres classes importantes d'agents sont les méta-agents. Ces derniers ont à charge de surveiller et de permettre la visualisation de l'information.

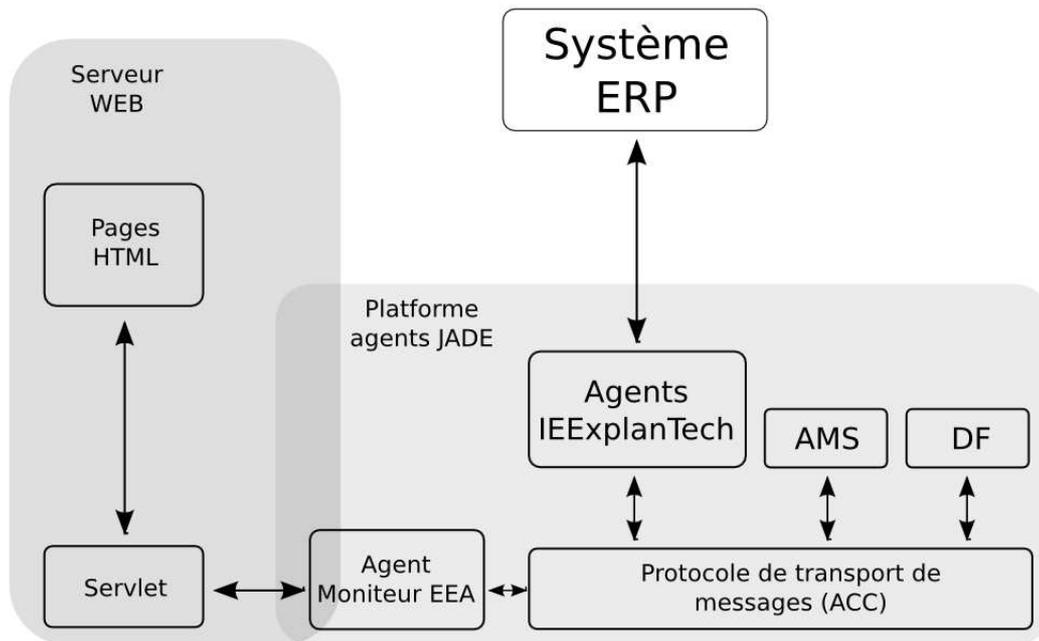


FIGURE 2.6 – Schéma pour l'implémentation d'ExplanTech

ExPlanTech conserve les mêmes classes d'agents que ProPlanT mais il comporte aussi les agents bases de données, configuration, planificateurs, moniteurs, et des agents ressources. Bien que ce système soit conçu pour la planification de la production, il ne considère pas un horizon de moyen terme. En fait, ExplanTech est conçu comme un système MES qui utilise l'information correspondant aux lots de production provenant du système ERP (voir figure 2.6 d'après Pechoucek et al. (2002)).

### 2.2.7 ADACOR

ADACOR a été développé comme une architecture pour la modélisation et l'implémentation de « systèmes agiles de production ». Parmi ses objectifs principaux se trouve la conception de systèmes capables de s'adapter aux changements, cela grâce à l'auto-organisation de ses composants (Leitão 2004). Le postulat des auteurs est qu'une architecture de ce type doit chercher à réaliser l'intégration des composantes de l'entreprise

par une organisation distribuée de sa structure. À son tour, cette architecture doit être susceptible d'être mise en application dans des environnements hétérogènes, intégrant les opérateurs dans leurs processus de décision et prenant en compte la coopération entre les différents acteurs. Cette architecture permet la planification et l'ordonnancement d'une façon distribuée. Pour cela le système requiert la synchronisation des sous-systèmes locaux et de leurs processus de supervision, avec pour objectif de supporter une optimisation globale des opérations (Leitão & Restivo 2006).

D'une manière générale, ADACOR définit cinq types d'agents : des agents d'opérations, des agents surveillants, des agents produits, des agents ordres et des agents interfaces. Les agents des opérations représentent les composants physiques du système et ces agents sont définis comme des agents sociaux, c'est-à-dire, avec la capacité d'interagir avec d'autres agents de façon autonome pour réaliser les travaux. Les agents surveillants se chargent de surveiller l'accomplissement des travaux. Les agents produits spécifient la gamme et incluent des mécanismes d'apprentissage des capacités des machines pour augmenter l'efficacité des processus. Les agents ordres représentent les ordres de production et leurs spécifications. Finalement, les agents interfaces sont des agents qui interagissent avec les personnes responsables du processus décisionnel. La figure 2.7 (d'après Leitão & Restivo (2006)) montre les différentes classes des agents dans ADACOR.

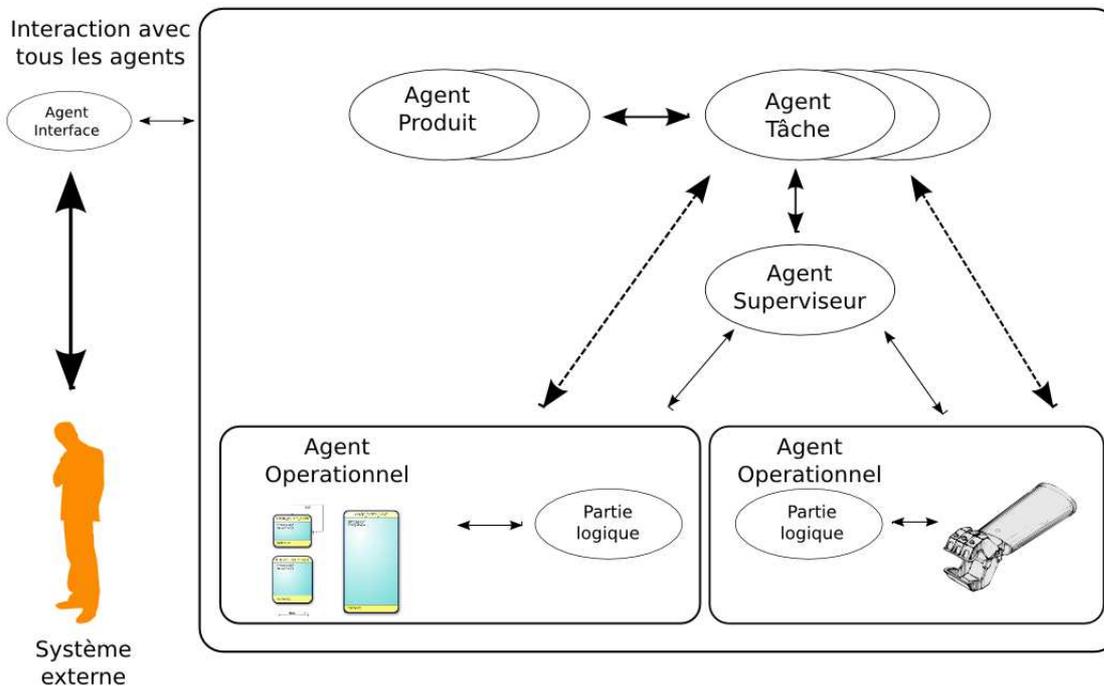


FIGURE 2.7 – Classes d'agents dans ADACOR

L'une des différences principales entre cette architecture et les autres approches, est l'incorporation de mécanismes d'apprentissage. Par exemple, les agents apprennent de

l'opération en cours pour décider à un moment déterminé, s'il est mieux de continuer l'opération ou de lancer un ré-ordonnancement de travaux.

### 2.2.8 Pabadis Promise

Pabadis Promise est une architecture pour le contrôle de la production basée sur une pyramide à trois niveaux d'automatisation (Wunsch & Bratukhin 2007). L'un des objectifs principaux est d'éviter la centralisation des décisions, en plaçant les décisions à des niveaux plus proches du flux de production. Les niveaux de décision correspondent au niveau ERP (niveau tactique), niveau MES (niveau opérationnel) et niveau Contrôle. La communication entre les niveaux ERP et MES, est basée sur des « services web » et pour la communication avec les autres niveaux, ACL (Agent Communication Language) est utilisé. L'architecture se base sur une décomposition d'opérations à partir d'un ordre de production déterminé au niveau ERP. La figure 2.8 (d'après Wunsch & Bratukhin (2007)) montre l'architecture générale de cette approche.

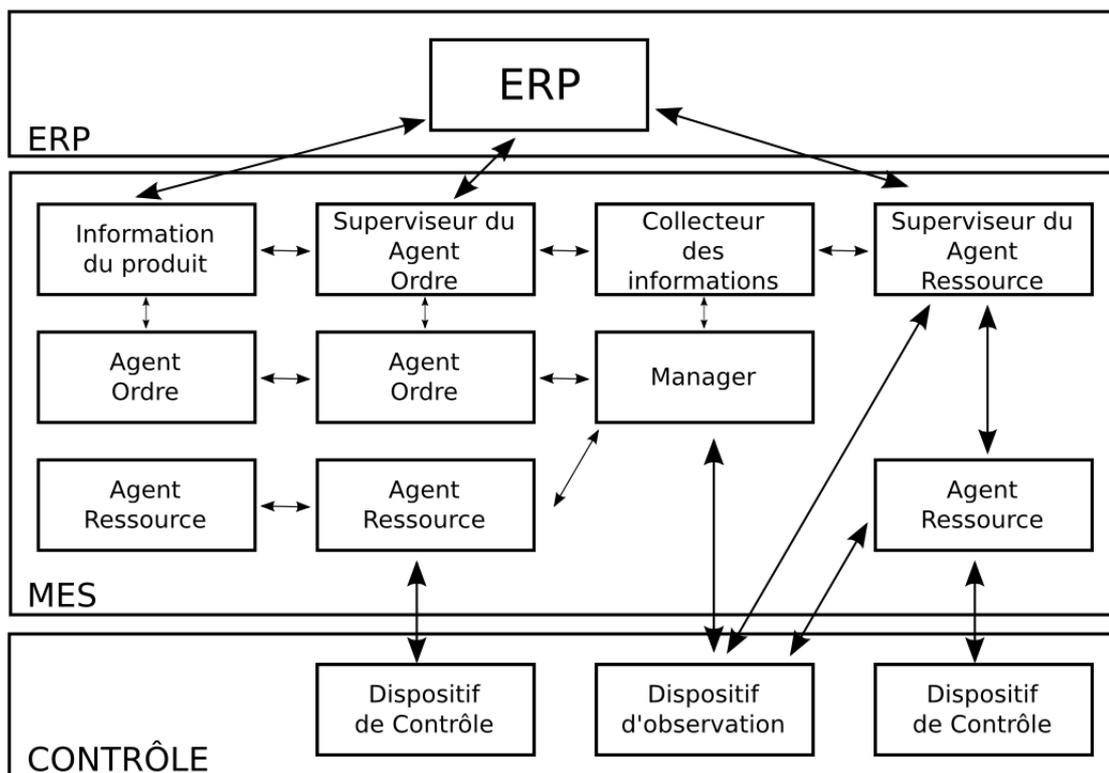


FIGURE 2.8 – Niveaux de décision dans Pabadis Promise

Les agents principaux dans l'architecture Pabadis Promise sont les « agents ordres » (order agent, OA) et les « agents ressources » (resource agents, RA). Au niveau MES, on trouve aussi trois entités de liaison avec le niveau ERP, qui sont : un agent pour surveiller les ordres envoyés par l'ERP au MES et aux agents ordres. Ces agents sont nommés « agents surveillants des ordres ». Un deuxième type d'agents sert de lien entre

le niveau ERP et le niveau contrôle, de telle manière que le niveau ERP puisse allouer les ressources (agents surveillants de ressources). Enfin, des agents « bases de données » mettent à disposition des informations concernant la nomenclature et la génération des gammes. Ces agents interagissent avec le niveau ERP et les agents ordres. Il faut noter que cette architecture a une orientation clairement MES, étant donné que le processus de décision commence par l'envoi d'un ordre de production à partir de l'ERP. Ensuite, cet ordre de production est décomposé et réalisé par le système multi-agents.

### 2.2.9 Autres approches

D'autres approches ont été proposées aussi comme cadres génériques, mais en général pour des domaines plus spécifiques. Par exemple, dans les travaux de (Giebels 2000, Wulink et al. 2002), une approche nommée EtoPlan (Engineering-to-order Planning) est présentée. Cette approche est une architecture de système pour la planification et le contrôle de systèmes holoniques de production. L'objectif de cette proposition est de définir une architecture qui peut permettre de faire face aux incertitudes dans les systèmes de production de type « production-to-order ». Cette approche intègre des processus d'ingénierie et de planification, étant donné que dans ce type de systèmes, on trouve de nombreux changements des exigences et spécifications du client.

Dans les travaux de Heragu et al. (2002), les auteurs proposent un cadre de modélisation pour des systèmes de contrôle de la production basé sur des agents intelligents. Cette approche définit trois types d'agents : les agents individuels, les agents cellules et les agents systèmes. Les agents individuels peuvent représenter des composants, des machines ou des équipements de manutention (MHD). Ceux-ci font appel à des processus de décision basés sur la négociation. Ils s'appuient sur une modification du « contract net protocol ». Les agents cellules correspondent à des groupes de machines et MHD qui peuvent être différenciés par leurs objectifs, leurs caractéristiques, les algorithmes ou encore les méthodes d'ordonnancement spécifiques qu'ils utilisent. Ces agents prennent des décisions en utilisant un module d'optimisation global qui donne des solutions aux agents individuels. Ces dernières peuvent changer les solutions données par les agents cellules quand des perturbations surviennent. L'agent de plus haut niveau représente tout le système et utilise aussi un système d'ordonnancement pour obtenir des solutions globales. On peut noter que dans cette approche il existe une forte hiérarchie de décisions. Cela peut être modifié en implémentant des algorithmes à différents niveaux.

Dans cette approche, il n'existe pas une claire définition des entités modélisées comme des holons et/ou comme des agents. Bien que l'approche soit proposée pour la planification et le contrôle de la production, il reste une autre faiblesse résident dans la difficulté de traiter le problème des différents horizons temporels dans le processus de décision et que, par ailleurs, elle ne traite nullement du niveau planning.

## 2.3 Systèmes contrôlés par le produit

Depuis l'apparition des différents paradigmes IMS au début des années quatre-vingt-dix, les chercheurs commencent à concevoir de différentes façons les systèmes de pro-

duction. Il existe entre ces nouveaux paradigmes quelques facteurs communs tels que la recherche de la flexibilité et de la reconfiguration par l'autonomie et l'adaptabilité des systèmes de production. Ainsi, par exemple, le concept d'holon provoque la distribution du contrôle grâce à la définition des entités capables de décider et de communiquer entre elles d'une manière autonome. Cette distribution conduit à distribuer le processus de décision entre les composants les plus élémentaires d'un système de production, que sont les machines et les produits. Comme on l'a vu dans la section précédente, bien que de nombreux cadres de modélisation et d'implémentation de ce type de systèmes ont été déjà proposés, c'est dans PROSA que nous trouvons l'une des premières définitions formelles du produit comme un organisme participant du processus de décision. Ainsi, cette architecture peut être citée comme étant à l'origine du concept « du Contrôle par le produit » qui apparaîtra plus tard. Bien que dans PROSA le produit est défini comme l'un de trois types d'holon de base, cet holon produit a un comportement plutôt passif dans le processus décisionnel. Ainsi, par exemple dans Valckenaers et al. (2003), chaque agent produit possède un modèle du type de produit auquel il appartient et non un modèle de l'état du produit dans le système physique. De cette manière, l'agent produit fournit l'information nécessaire à l'agent ordre, qui est celui qui, finalement, prend les décisions. Ainsi, l'holon produit agit comme un *serveur d'information* pour les autres agents. Une définition similaire de ces fonctions peut être trouvée dans les travaux de Bongaerts et al. (2000).

De façon contemporaine à la proposition de PROSA, dans Petin et al. (1998) les auteurs exposent les avantages d'embarquer de l'intelligence dans des dispositifs physiques. De plus, les auteurs cherchent à traiter différemment les données, avec pour objectif que les dispositifs peuvent améliorer leurs opérations internes et leurs fonctionnalités (système CMM : Control, Maintenance and technical Management). Pour réaliser cet objectif, les dispositifs physiques doivent posséder la connaissance nécessaire pour évaluer leurs actions à l'égard de tout le processus. La figure 2.9 (d'après Petin et al. (1998)) montre comment ces dispositifs sont conçus comme des entités coopératives dans une architecture interopérable.

Dans les travaux de Wong et al. (2002) et de McFarlane et al. (2003) les auteurs montrent les possibilités induites par l'usage de produits intelligents grâce à l'usage de la technologie RFID. L'implémentation de produits intelligents permet d'obtenir, en plus de l'information conventionnelle, comme par exemple, la température, la position ou la vitesse, des informations relatives à l'identité, aux instructions ou à la traçabilité des produits. Dans McFarlane (2002), l'auteur montre que le traitement de l'information à partir du flux de production, par l'usage d'un contrôle réalisé en exploitant l'information renvoyée par le produit, permet d'obtenir une observation complète du système, contrairement aux systèmes conventionnels de contrôle de la production qui permettent seulement une observation partielle. De plus, dans les travaux de (McFarlane et al. 2002), se trouve pour la première fois une référence directe à l'intégration du produit comme entité décisionnelle contrairement à la boucle de contrôle classique (2.10) (d'après McFarlane (2002)). Ces travaux définissent ce nouveau paradigme de contrôle comme *Contrôle par le produit* ( Intelligent Product Driven Control ).

C'est sur ces bases que l'on a commencé à concevoir un produit dans lequel on peut

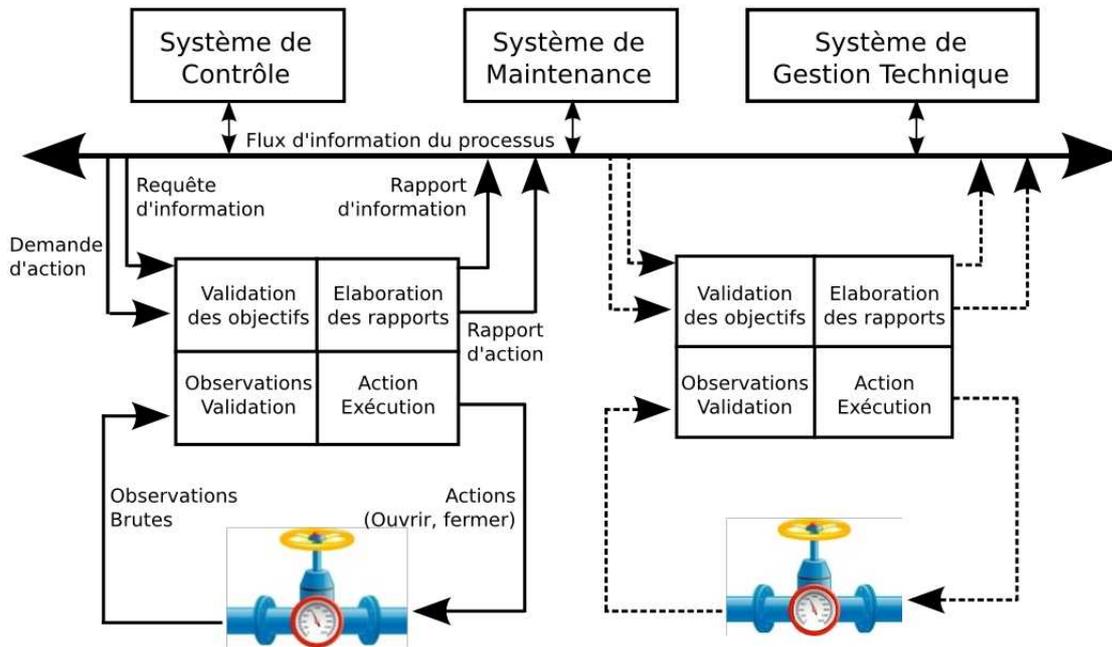


FIGURE 2.9 – Architecture interopérable pour le niveau contrôle

embarquer de l'intelligence avec pour objectif de rapprocher le processus décisionnel et le flux d'informations du flux de production. Dans McFarlane et al. (2003), un produit intelligent est défini comme une représentation physique et informationnelle d'un produit qui :

- ⇒ possède une identification unique.
- ⇒ est capable de communiquer effectivement avec son environnement.
- ⇒ est capable d'enregistrer des informations sur lui même.
- ⇒ développe un langage pour communiquer ses caractéristiques, requêtes de production, etc.
- ⇒ est capable de participer aux décisions le concernant.

D'autre part, dans Bajic & Chaxel (2002) les auteurs présentent une application dans laquelle l'usage de technologies RFID permet d'étendre le processus de décision dans le cycle de vie du produit. Cela a été spécifiquement appliqué au service après vente. Le

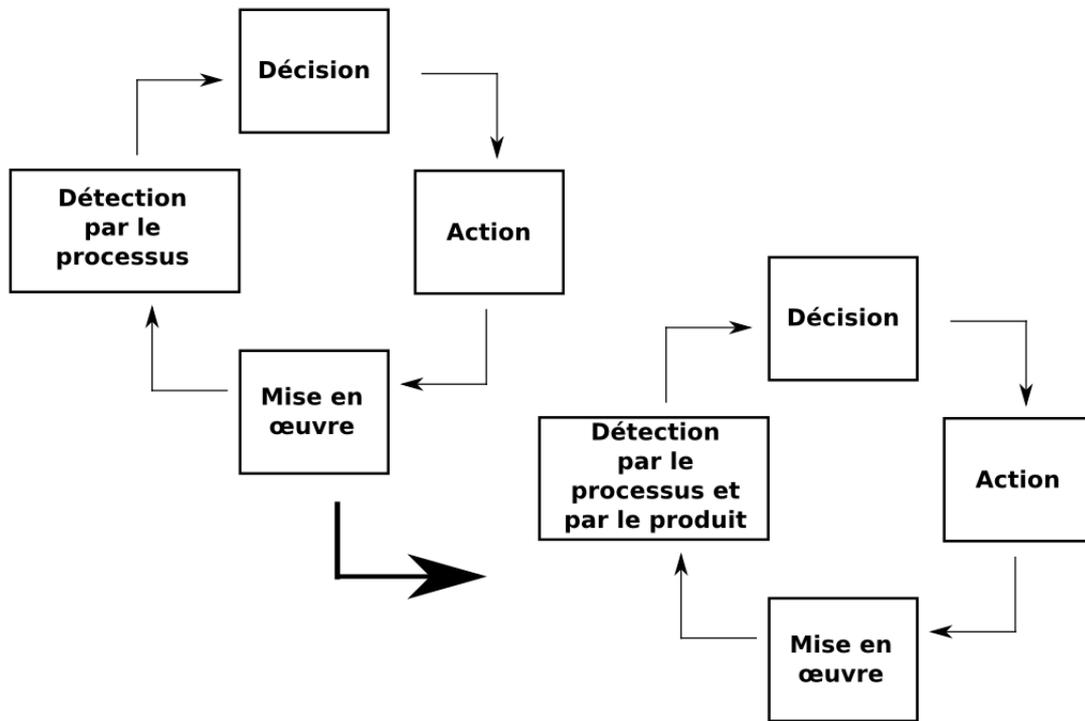


FIGURE 2.10 – Impact général des systèmes Auto-ID en la boucle de contrôle

système proposé permet d'automatiser le processus de recyclage des produits en enrichissant l'information relative au produit. Les auteurs mettent l'accent sur l'importance de la distribution de l'information sur les dispositifs RFID, comme élément clef pour un bon fonctionnement de systèmes de ce type. Celui-ci est mesuré par des indicateurs comme la robustesse, la réactivité ou l'autonomie.

Basé sur des produits intelligents et des technologies web, Kärkkäinen et al. (2003) proposent un système de contrôle pour un réseau d'approvisionnement. Les problèmes abordés concernent la gestion et l'exécution de l'intégralité de projets d'investissements depuis le traitement des matières premières jusqu'aux facteurs de production. Le système proposé utilise des produits capables de communiquer avec un système d'informations qui actualise celles qui sont enregistrées dans des agents (voir figure 2.11 d'après Kärkkäinen et al. (2003)). Le contrôle de ce système est défini comme *inside-out control*, représentant l'idée de produits porteurs du processus de décision et, grâce à la coopération et la coordination avec d'autres processus, déclenchent les activités et processus associés.

Parmi les avantages des systèmes de ce type, on peut citer les importantes réductions de coûts par l'amélioration de la gestion de l'information. Parmi les inconvénients, on trouve le coût du système d'information et du système d'identification.

Par ailleurs (Morel et al. 2003) exposent les avantages du concept de contrôle par le produit dans le contexte de B2M (Agile Business to Manufacturing). Ainsi, l'information embarquée sur les produits contribue à assurer la traçabilité de produits personnalisés,

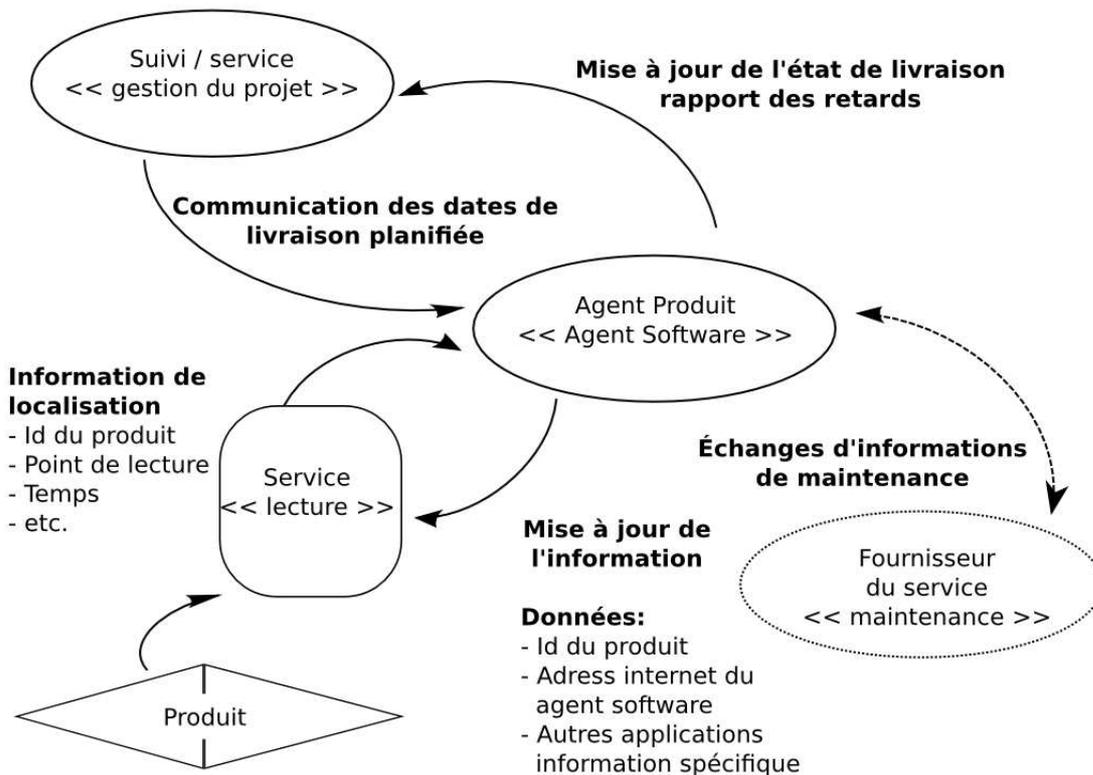


FIGURE 2.11 – Structure du système d'information en réseaux

la gestion des matières premières et des services logistiques associés au processus de production. De plus, dans Morel et al. (2007), les auteurs présentent ce changement opéré entre les paradigmes conventionnels de contrôle et le contrôle par le produit appliqué à des systèmes de production 2.12 (d'après Morel et al. (2007)). Le produit y est ainsi vu comme le « contrôleur » des ressources du système de production.

Dans Gouyon (2004) la conception d'un système de production grâce à l'usage du concept de contrôle par le produit est à nouveau décrite. Dans une première partie, les fondements d'ingénierie nécessaires à ce changement de paradigme de contrôle sont exposés. Ce cadre d'ingénierie y est dénommé *approche d'ingénierie d'automatisation de systèmes de contrôle par le produit*. En termes applicatifs, ces travaux présentent un système de routage de produits dans lequel les produits sont capables de communiquer avec le système MES et de prendre des décisions en ce qui concerne les meilleures alternatives de routage. L'ensemble des trajectoires qui permettent la fabrication des produits est ainsi obtenu automatiquement.

D'autre part, dans Sallez et al. (2004), deux approches hétérarchiques sont mises en application. Ces approches permettant le contrôle de systèmes flexibles de production, sont *orientées ressources* et *orientées produits*. Cette dernière, a été conçue en utilisant le concept de stigmergie. Ainsi, les produits circulent dans la cellule de production, récupèrent et actualisent les valeurs de phéromone dans chaque nœud du système. L'approche orientée produits présente des caractéristiques de robustesse et d'adaptabilité, bien que

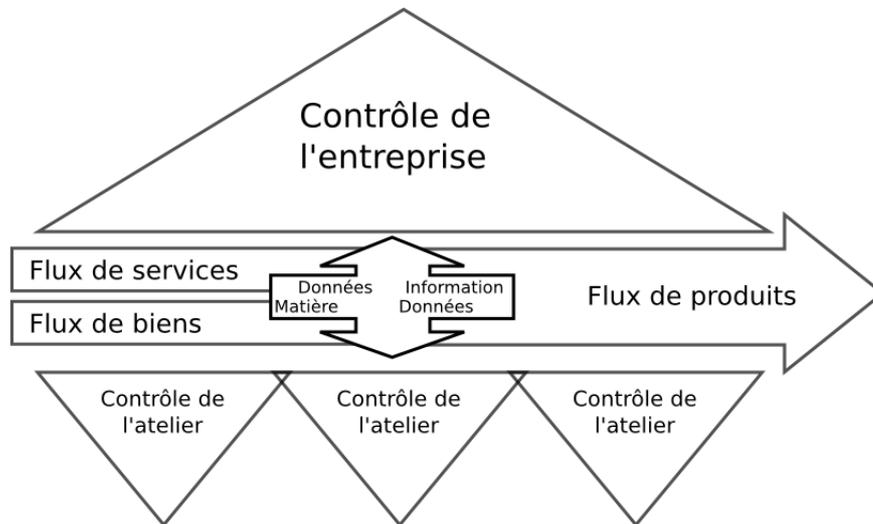


FIGURE 2.12 – Contrôle par le produit des chaînes logistiques

conformément aux auteurs, on ait besoin d'une plus grande structure pour valider concrètement les résultats obtenus. Un des inconvénients que peut présenter cette proposition, réside dans le fait qu'il augmente considérablement la taille du système. Le nombre de routes possibles semble trop important à l'égard du nombre des routes explorées par les produits. Cela peut éventuellement conduire, à ce que le système de contrôle ne soit pas capable d'atteindre un nombre suffisant d'états compte tenu de la complexité du système de production.

Par ailleurs, Valckenaers & Van Brussel (2005) proposent aussi une approche par stigmergie, dans laquelle il considère une exploration *virtuelle* des différentes routes. Pour cela, il définit un agent produit (fourmi) comme une entité abstraite qui explore les différentes routes. Cette exploration n'est pas réalisée « physiquement » dans le système, mais d'une façon algorithmique et est exécutée par un agent ordre qui est le responsable de la communication avec le reste du système. À l'inverse du travail de Sallez et al. (2004), cela change le caractère holonique du produit, puisque les différentes routes (les solutions) sont évaluées d'une manière centralisée par l'agent ordre.

Ainsi, dans le travaux de Sallez et al. (2004), on peut visualiser une approche « pure » du concept de contrôle par le produit, où l'intelligence du système résulte d'une synergie entre les composants, ce qui fait dépendre fortement les résultats du nombre possible d'états générés par ceux-ci. Dans le prochain chapitre, nous étudierons d'une manière plus détaillée cette dichotomie issue des termes de la « loi de la variété requise » .

D'autres travaux de cette époque ont aussi utilisé le concept de contrôle par le pro-

duit, citons par exemple Simão (2005) qui a développé un outil de simulation pour le contrôle par le produit et un méta-modèle de contrôle pour les systèmes holoniques de production. Les travaux de Kim et al. (2006) présentent un algorithme pour automatiser le processus d'assemblage de pièces basé sur une information provenant du produit. Les résultats montrent que la séquence proposée présente des caractéristiques de modularité, de capacité de paramétrisation et d'adaptation. Dans Panjaitan & Frey (2006) est proposé un système de contrôle basé sur diverses technologies qui matérialisent le concept de contrôle par le produit à un niveau d'exécution. Ainsi, ce système donne aux produits la capacité de décider de sa propre stratégie de contrôle (ordonnancement des travaux sur les machines). D'autre part, dans (Pannequin et al. 2007, Pannequin et al. 2009) les auteurs ont abordé les problèmes de la validation de systèmes contrôlés par le produit grâce à des techniques de benchmarking et d'émulation.

## 2.4 Conclusion et objectifs spécifiques des travaux de thèse

Faisant suite à l'analyse présentée dans ce chapitre, nous pouvons constater qu'actuellement, bien que de nombreux cadres de modélisation de systèmes holoniques ou basés sur des agents ont été proposés, il n'existe pas actuellement de cadre de modélisation de systèmes hybrides centralisés / distribués basés sur le concept de contrôle par le produit. De plus, il est possible de constater que la plupart des travaux autour du paradigme IMS ont été réalisés principalement à un niveau opérationnel et d'exécution, et qu'il n'existe pas de travaux qui considèrent le niveau tactique. Par ailleurs, on peut observer que le concept de contrôle par le produit a été mis en application principalement à un niveau d'exécution et nous n'avons pas trouvé de travaux qui explorent ce concept de façon multi-niveaux. À notre avis, ces faits justifient l'originalité et l'intérêt de notre proposition. De cette façon, pour concrétiser notre problématique spécifique, nous définissons les objectifs suivants :

- ⇒ La proposition d'un cadre de modélisation des systèmes hybrides basés sur le contrôle par le produit.
- ⇒ L'application du cadre de modélisation proposé à des problèmes de planification et pilotage de la production.
- ⇒ Le développement d'une application qui permette la simulation de l'approche proposée.
- ⇒ La validation des résultats face à un cas d'étude industriel.

# Chapitre 3

## Cadre de modélisation basé sur le Modèle de Système Viable

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Le Modèle de Système Viable . . . . .</b>	<b>42</b>
3.1.1	Fonctions dans le modèle de système viable . . . . .	43
3.1.2	Variété et récursivité . . . . .	44
3.1.3	Avantages de l'approche . . . . .	45
<b>3.2</b>	<b>VSM comme cadre de modélisation pour des systèmes contrô-</b>	
	<b>lés par le produit ( VSM-SCP ) . . . . .</b>	<b>49</b>
3.2.1	Quelques idées de base . . . . .	49
3.2.2	Le produit intelligent comme un système viable . . . . .	50
3.2.3	Implémentation des systèmes contrôlés par le produit . . . . .	52
<b>3.3</b>	<b>Modélisation d'un système PPP hybride contrôlé par le pro-</b>	
	<b>duit ( VSM-SCP-PPP ) . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>3.4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>58</b>

---

Comme on l'avait énoncé dans le chapitre précédent, notre proposition consiste en un système hybride centralisé/décentralisé de planification et de pilotage de la production basé sur le concept de contrôle par le produit. Ce système procurera la flexibilité nécessaire pour obtenir une réponse rapide à des perturbations internes et/ou externes, tout en sauvegardant les objectifs issus des décisions à moyen terme concernant l'efficacité et la stabilité des plans. La conception d'un système de ce type nécessite l'utilisation d'une méthodologie de modélisation pour une claire définition des composants du système et de leurs relations. Comme on a pu le voir dans la section 2.4, il n'existe pas actuellement de méthodologie générale pour la conception spécifique de systèmes de cette classe.

C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous allons proposer un cadre général pour la modélisation des systèmes de planification et de pilotage de la production contrôlés par le produit. Pour autant, le cadre de modélisation proposé est conçu de telle manière qu'il puisse s'appliquer à un quelconque système de production de biens et de services. Cette intention nous amène à la recherche de concepts suffisamment génériques, de telle manière

qu'ils puissent supporter, tant pour les aspects théoriques qu'applicatifs, la complexité inhérente à ce genre de systèmes. Ainsi, la base conceptuelle choisie qui supportera la modélisation sera le *Modèle de Système Viable* (Beer 1972, Beer 1984).

Le choix fait du « modèle de système viable » comme base théorique et conceptuelle du cadre de travail proposé, est principalement dû au fait que celui-ci est basé sur le concept de récursivité et que ce modèle intègre des caractéristiques lui permettant de gérer le compromis entre l'autonomie et le contrôle tout en permettant d'implémenter des principes comme l'hétérarchie et la coopération (Herrera et al. 2011). Ceux-ci sont des éléments essentiels des systèmes contrôlés par le produit, et d'une manière plus générale des systèmes à base d'agents.

Le *Modèle de Système Viable* (VSM pour Viable System Model), depuis son origine dans les années cinquante comme résultat des travaux de Stafford Beer, a été l'objet d'une constante validation et de multiples applications jusqu'à nos jours. La pertinence de ce modèle peut encore être observée dans des applications récentes concernant des domaines comme la gestion de la production (Herrmann et al. 2008, Rosenkranz et al. 2008), les systèmes distribués autonomes (Grishikashvili 2005, Ribeiro-Justo et al. 2007, Thompson et al. 2009) ou encore pour la modélisation de communautés d'agents autonomes pour des applications astronautiques (Truszkowski & Karlin 2000). Il peut paraître étonnant de constater son absence dans des projets tels que IMS, compte tenu des similitudes entre les caractéristiques de VSM et les objectifs d'IMS.

La suite de ce chapitre est décomposée en trois parties principales. La première partie est dédiée à l'introduction de quelques éléments essentiels de VSM, nécessaires pour la modélisation des systèmes proposés. La deuxième partie applique le cadre conceptuel de VSM pour la modélisation des systèmes contrôlés par le produit, en conservant une généralité suffisante pour son application à différentes classes de systèmes susceptibles d'être implémentés. Finalement, la troisième partie concerne l'application du cadre de modélisation proposé aux systèmes de planification et pilotage de la production (PPP).

### 3.1 Le Modèle de Système Viable

VSM résulte des travaux de recherche de Stafford Beer (Beer 1959, Beer 1966, Beer 1972, Beer 1984) dans les domaines des neurosciences, de la cybernétique, de la recherche opérationnelle et des sciences sociales. Les origines de VSM datent de ses travaux appliqués à l'industrie de l'acier dans les années cinquante (Beer 1984). Ces recherches peuvent se situer dans la lignée des travaux de Norbert Wiener, Warren McCulloch et Ross Ashby (Espejo 2003). L'objectif principal du modèle a été de montrer et d'expliquer *comment quelques systèmes réussissent à être viables*, autrement dit, comment il est possible que certains systèmes aient une existence indépendante.

Bien que VSM soit un modèle général d'étude des systèmes viables, son plus grand domaine d'application est relatif aux *organisations d'activités humaines*, comme par exemple les institutions, les corporations, les entreprises ou les gouvernements (Beer 1971). Dans ce domaine, VSM change la vision du modèle d'administration classique basé sur la *commande et le contrôle*, dans lequel, un système d'administration est conçu comme une pyramide de telle manière que les décisions sont désagrégées d'une façon *top-down* aux

différents niveaux structuraux. La principale différence ici, inspirée de l'organisation biologique, consiste à changer la hiérarchie par une *récurtivité structurale* (Espejo 2003).

À l'initiative de ce changement de perspective, Stafford Beer a montré que les êtres vivants, à partir de leurs composants les plus élémentaires comme les cellules qui possèdent des propriétés d'autonomie, d'auto-organisation et d'auto-régulation, pourraient avoir une existence indépendante. En effet, la différenciation des fonctions et les relations entre ces composants élémentaires, produisent des systèmes plus complexes, sans que ces sous-systèmes ne perdent leurs propriétés d'auto-organisation et d'auto-régulation.

L'une des propriétés les plus importantes d'un système viable est la récurtivité. Tout système viable contient et sera contenu par un autre système viable. De ce fait, chaque sous-système maintient son autonomie vis-à-vis de son environnement, mais il contribue également à l'existence du système viable dans lequel il est compris. De cette manière, un système viable et ses différents sous-systèmes auront les mêmes exigences structurales. Un système viable cherchera à maintenir ses objectifs grâce à une cohésion globale et s'adaptera à son environnement grâce à son autonomie.

### 3.1.1 Fonctions dans le modèle de système viable

VSM s'est développé à partir de la recherche *d'invariants* dans les systèmes biologiques. Ces derniers permettent de construire un *homomorphisme* de leurs fonctions, leur organisation et leur structure. Ainsi, Beer définit cinq fonctions élémentaires que tout système viable doit posséder : l'implémentation, la coordination, le contrôle, l'intelligence et la politique.

#### Implémentation

Cette fonction se réfère aux *activités primaires produisant* les produits ou les services qui matérialisent l'identité du système (Espejo & Harnden 1989). Ces activités ajoutent de la valeur aux produits et sont identifiées par l'analyse de ce que *fait* le système. D'ailleurs, dans un système viable, les activités primaires peuvent avoir ou non une différenciation fonctionnelle.

#### Coordination

Cette fonction correspond à la coordination entre les activités primaires. Dans un système viable, cette coordination n'est pas forcément réalisée d'une manière *top-down* comme dans un système organisationnel hiérarchique. En effet, les activités primaires peuvent être coordonnées, autant d'une façon centralisée que d'une façon distribuée, grâce à la coopération et à l'échange d'informations entre les sous-systèmes.

#### Contrôle

Dans un système viable, le contrôle fait référence à la fonction qui règle et assure l'auto-organisation du système. Celle-ci est obtenue grâce à la fonction de coordination (exposée antérieurement) et à la sous-fonction de surveillance. La fonction de surveillance permet à la fois d'évaluer les activités primaires et de garantir la cohérence dans l'activité

globale (l'ensemble des activités primaires). On peut ainsi observer que la fonction de contrôle est celle qui détermine le degré de contrôle/autonomie (centralisé/distribué) des actions réalisées par les activités primaires.

## Intelligence

La fonction d'intelligence est responsable de l'adaptabilité du système. Cette fonction fait le lien entre les activités primaires et l'environnement. Pour réussir cette adaptation, la fonction d'intelligence doit être capable de traiter l'information qui vient de l'environnement avec l'objectif d'anticiper les aléas. D'ailleurs, cette fonction est responsable de la cohérence entre les objectifs locaux et globaux.

## Politique

La fonction de politique est garante des objectifs du système aux différents niveaux. Elle veille à l'accomplissement de ces derniers.

### 3.1.2 Variété et récursivité

La variété d'un système est définie comme les différents états possibles de celui-ci et elle sera utilisée comme l'unité de mesure de la complexité. De cette façon, un contrôleur sera efficace s'il est capable d'atteindre au moins les mêmes états que ceux du système qu'il veut contrôler. Cela a été exprimé par Ashby (Ashby 1957) dans la *loi de la variété requise*.

« A “controller” has requisite variety - that is, has the capacity to maintain the outcomes of a situation within a target set of desirable states - if and only if it has the capacity to produce responses to all those disturbances that are likely to take the outcomes out of the target set. »

Pour ce faire, un système viable cherchera à réduire la variété (variations) provenant de l'environnement et à amplifier la variété (variantes) de sa fonction de contrôle pour obtenir un équilibre (homéostasie). La variété que le système n'est pas capable de contrôler (variété résiduelle), devra de toutes manières être absorbée par l'organisation du système, avec l'objectif d'assurer sa viabilité (Espejo 2003). Il faut noter que si le système n'est pas capable de contrôler la variété résiduelle, cela peut conduire à la perte de l'identité du système.

Le diagramme présenté dans la figure 3.1, correspond à la structure basique de VSM. À savoir, une structure basée sur la loi de la variété requise. La figure 3.2 montre le même diagramme que la figure précédente avec pour seule différence le fait que, dans un système viable, la fonction d'intelligence comprise dans la gestion (contrôle) du système, doit aussi obtenir l'information depuis l'environnement pour anticiper les changements.

De plus, la figure 3.3 montre une vision générale de VSM. Il est possible d'y observer que la gestion est composée des trois fonctions : politique, intelligence et contrôle. Les relations entre celles-ci montrent que la boucle « intelligence et contrôle » doit prendre en compte les objectifs du système à ce niveau de récursivité.

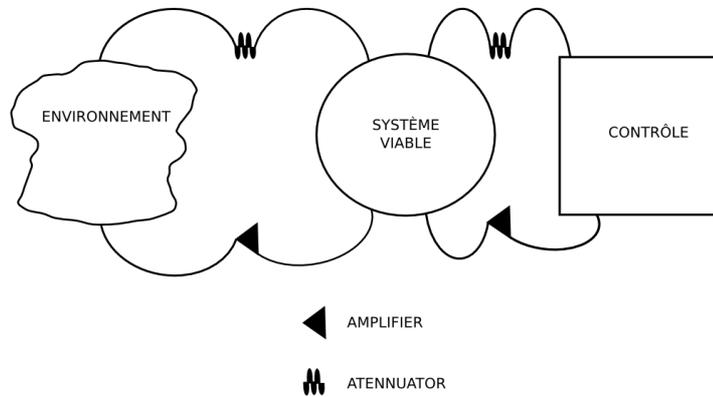


FIGURE 3.1 – Loi de la variété requise

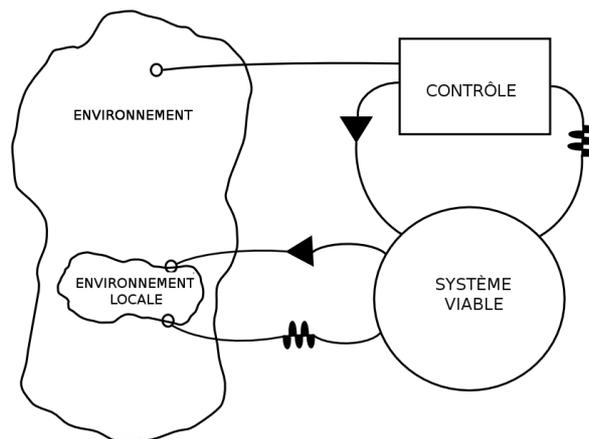


FIGURE 3.2 – Fonction d'intelligence

La fonction de coordination (anti-oscilatory) et la fonction de surveillance (sporadic audit) correspondent aux flux d'informations qui permettent respectivement l'amplification et la réduction de la variété. De plus, la partie du système viable objet du contrôle sera celle du système où auront lieu les activités primaires (implémentation). Cette partie peut être décomposée en d'autres systèmes viables aux niveaux récursifs inférieurs. La figure 3.4 montre une décomposition en trois sous-systèmes, à titre d'exemple.

### 3.1.3 Avantages de l'approche

Comme il a été antérieurement exposé dans l'introduction, trois paradigmes principaux de systèmes de production ont été développés à partir du projet IMS : les systèmes de

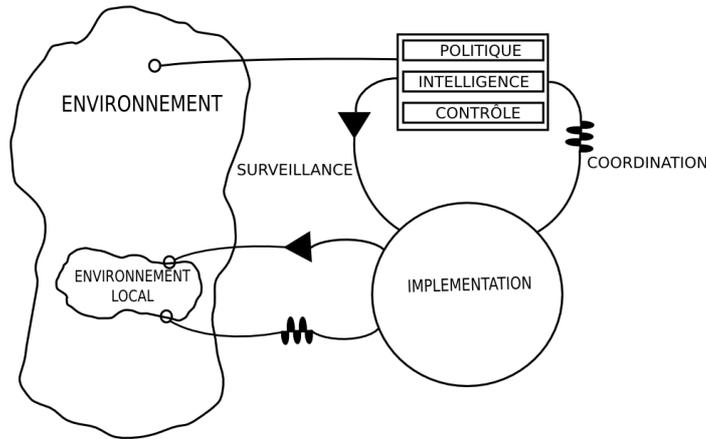


FIGURE 3.3 – Fonctions dans un Système Viable

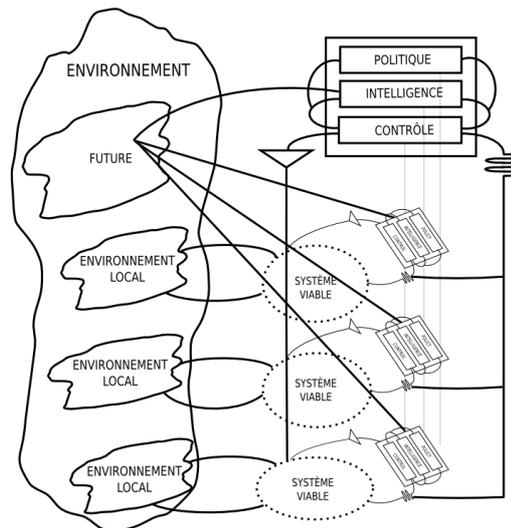


FIGURE 3.4 – Exemple d'un Système Viable

production bioniques, fractals et holoniques. Toutes ces approches ont utilisé des concepts développés dans le cadre des systèmes à base d'agents. Cela provient principalement d'un changement d'une vision centralisée à une vision distribuée du processus de décision. Le concept d'hétéarchie en est une illustration. Il concerne la distribution du processus décisionnel à des entités plus proches du flux de production, avec pour objectif d'augmenter la réactivité en octroyant aux entités l'autonomie nécessaire pour une décision opportune. Dans ce sens, une question intéressante pourrait être : quel est le degré de hiérarchie/hétéarchie que doit posséder un système de cette classe ? (Trentesaux 2007).

Par ailleurs, cette organisation est composée d'agents qui sont conçus comme des organismes autonomes et coopératifs qui s'organisent à travers une certaine relation entre hiérarchie et hétéarchie, pour assurer un compromis entre la flexibilité et la cohésion des

objectifs globaux. Ici la question qui se pose est : de quelle façon ces agents réaliseront-ils leur processus de coopération et de cohésion de telle sorte qu'ils obtiennent la flexibilité désirée ? De plus, les différentes approches d'IMS considèrent comme l'un de leurs objectifs principaux de permettre « l'extension » de la structure, en permettant l'implémentation de modules réutilisables et permettant de clarifier la définition des fonctions à chacun des niveaux. Ceci permet de disposer de structures qui intègrent un nombre croissant de fonctions, tout en conservant toujours une cohérence globale.

Ainsi, il nous semble que l'utilisation de VSM comme cadre conceptuel et théorique de modélisation, permet de donner une réponse à plusieurs de ces questions, tout en proposant une synthèse des différents paradigmes développés autour des systèmes intelligents de production. De plus, VSM permet de définir de façon structurée les fonctions qu'un système doit implémenter pour pouvoir montrer des propriétés comme l'adaptabilité, l'autonomie ou la robustesse. Par la suite, nous allons expliquer la concordance entre les différentes approches proposées à partir d'IMS et VSM, ainsi que la manière avec laquelle ce modèle permet l'incorporation des différents sujets d'étude concernés.

### **Hierarchie/Hétérarchie et degré de Contrôle/Autonomie**

La relation hiérarchie/hétérarchie a été l'un des sujets les plus amplement étudiés dans le cadre des systèmes viables. D'une manière générale, VSM intègre cette relation en termes de degré de contrôle/autonomie, qui serait implémentée dans la fonction de contrôle. La fonction de surveillance (monitoring) est expressément définie dans le but d'auditer le fonctionnement des activités primaires (agents) et non pour piloter comme dans le système conventionnel de commande/contrôle. De manière plus spécifique, la détermination du degré de contrôle/autonomie nécessaire a été étudiée par Espejo (Espejo 2003) avec la proposition de la méthode VIPLAN (Viable Plan). Ainsi, l'auteur propose que le degré d'autonomie/contrôle dépende de l'impact que chacune des activités primaires a dans le reste des activités du système (nommées comme des activités d'appui).

On peut représenter n'importe quel système (hiérarchique/hétérarchique) comme un système viable, dans lequel le degré de contrôle/autonomie sera déterminé par l'impact des activités primaires dans le reste de l'organisation. Cela déterminera à son tour les mécanismes nécessaires pour obtenir le degré de contrôle/autonomie désiré.

### **Adaptabilité**

L'étude de l'adaptabilité est à l'origine du développement de VSM (Beer 1984). Comme il est décrit dans la section précédente, VSM a été développé dans l'objectif de comprendre le mécanisme qui permet aux organismes biologiques de survivre à des changements de l'environnement. Cette caractéristique a aussi été l'un des objectifs de base des paradigmes proposés à partir du projet IMS (Yoshikawa 1995). Par conséquent, un système viable est conçu pour s'adapter à un milieu changeant par la mise en œuvre des mécanismes nécessaires pour maintenir sa viabilité. Ici, il n'est pas possible d'identifier une fonction en particulier qui assure l'adaptabilité, puisque tout le système et ses différentes fonctions ont été définis pour aboutir à cet objectif.

En conclusion, un système viable est clairement un système qui cherche à adapter sa

structure vis-à-vis des perturbations internes ou externes. Cette propriété d'adaptabilité amène au fait qu'un système viable ait des propriétés comme la robustesse ou la reconfiguration. Ces propriétés ont été amplement acceptées comme caractéristiques de base des systèmes intelligents de production.

## Extensibilité

L'extensibilité (Scalability en anglais) dans le contexte de systèmes à base d'agents est définie comme la tolérance à la complexification, c'est-à-dire la capacité à ajouter des fonctionnalités et à augmenter le nombre de composants (Jouvin 2003). Ainsi, l'extensibilité est une des composantes fondamentale des systèmes viables étant donné que ces systèmes sont nettement récursifs. Les systèmes biologiques en général sont des systèmes qui forment des structures grâce à des *sauts de complexité* à partir des composants élémentaires (Fromm 2004). Ainsi, la complexité biologique nous montre par exemple la formation d'un organisme à partir d'un atome, une molécule, une cellule, un tissu, un organe, un système et enfin un organisme. De la même façon et comme nous l'avons déjà vu, grâce à un homomorphisme des fonctions fondamentales, un système viable contiendra toujours un système viable et sera contenu dans un autre système viable.

Cette notion de récursivité a été principalement exploitée par les systèmes bioniques de production et elle a aussi été exploitée par les systèmes fractals qui démontrent de claires propriétés de récursivité et d'auto-similarité. Cette dernière propriété d'auto-similarité des systèmes fractals est aussi incluse dans les systèmes viables au travers de sa propriété de *récursivité structurale*. De cette façon, un système viable conservera les mêmes exigences structurales à tous les niveaux de complexité. Ces concepts ont une relation directe avec un autre objectif des systèmes IMS qui est l'objectif de réutilisation.

VSM présente donc une grande concordance avec les objectifs et les caractéristiques désirées des systèmes bioniques, fractals et holoniques de production. Cependant, jusqu'à présent, nous pouvons observer un manque de recherche à l'égard de certaines propriétés des systèmes viables. Celui-ci peut s'expliquer par le fait que ce modèle a été majoritairement utilisé comme un outil pour l'étude des *organisations d'activités humaines*, c'est-à-dire des entreprises, des sociétés, des institutions ou des pays.

Par conséquent, au vu de tout ce qui a été exposé, l'objectif de notre approche de modélisation sera d'utiliser tous les avantages de VSM tout en contribuant à l'élargissement de son application. La prochaine section présentera un cadre général de modélisation qui permet la conception d'un système de planification et de pilotage de la production avec l'idée d'intégrer le produit comme élément central du processus décisionnel et « brique » de base du système récursif.

Compte tenu de la diversité des objectifs, des structures et des problèmes décisionnels des systèmes de production, un modèle spécifique pourra seulement être défini une fois que les caractéristiques du système objet d'étude seront connues. L'application concrète du cadre de modélisation présenté dans cette section sera réalisée dans le chapitre suivant.

## 3.2 VSM comme cadre de modélisation pour des systèmes contrôlés par le produit ( VSM-SCP )

L'objectif de cette section est d'appliquer le cadre conceptuel de VSM pour développer une approche de modélisation des systèmes contrôlés par le produit. Rappelons que l'objectif de la thèse est la proposition d'un système hybride centralisé/distribué pour la planification et le pilotage de la production, et que l'approche de modélisation proposée a été conçue pour rester suffisamment générale pour modéliser des systèmes différents.

### 3.2.1 Quelques idées de base

Comme nous l'avons exposé précédemment, un système viable est conçu à partir des activités primaires (les entités du système qui réalisent la transformation). Une décomposition récursive classique d'un système de production, décomposerait celui-ci en : atelier, cellules de production, lignes de production et machines. Alors, les machines seraient les entités atomiques du système comme Gou et al. (1998) l'ont proposé par exemple.

A contrario, dans nos travaux et pour implémenter le concept de « systèmes contrôlés par le produit », nous considérons ce dernier comme l'entité décisionnelle qui est chargée de conduire la transformation. Ainsi, il sera interprété comme l'élément principal et de plus bas niveau du processus de production de notre système viable. Les autres composants du système comme les machines, les convoyeurs, les actionneurs, etc., seront vus comme des éléments de l'environnement. Ceux-ci interagiront avec le produit uniquement en termes de disponibilité, contraintes, défauts, etc. Notre structure récursive s'appuiera sur les différents niveaux de regroupement de produits (produit, ordre de fabrication, ensemble d'ordres). Ainsi, le niveau de complexité augmentera en fonction de ces niveaux d'agrégation, chacun d'eux étant considérés comme un système viable.

Dans notre interprétation, le produit intelligent est capable d'interagir avec son environnement. Ainsi lorsqu'il évolue dans un atelier ou une chaîne logistique, il est capable de récupérer des informations concernant son état et l'état du système. Par conséquent, tout le système de planification et de pilotage pourrait être défini à partir de celles-ci, et donc, les différents problèmes de décisions seraient affectés à ces différents niveaux d'agrégation.

Cette approche est assez différente de l'approche holonique, dans laquelle, on considère les produits et les ressources comme des entités actives (Van Brussel et al. 1998). Cependant, il faut noter que VSM permet aussi aux différents niveaux une *multi-fonctionnalité* des activités, tel que cela se passe dans un système vivant. Ainsi, il serait possible de considérer les ressources comme des entités actives et donc de modéliser des systèmes holoniques.

Un autre avantage de notre interprétation de VSM est l'adaptabilité du modèle aux modes de fonctionnement du système. Ainsi, chaque niveau pourra correspondre à un niveau de décision (planification, ordonnancement, mise en œuvre) mais aussi à une entité de pilotage (ordre de fabrication, lot, pièce).

La modélisation des communautés d'agents en tant que systèmes viables nous permet de les définir comme des *holarchies cognitives*. Dans des travaux récents (Mella 2009), l'auteur définit VSM comme une organisation d'holons. Celle-ci est interprétée comme

une holarchie cognitive composée de sous-holons qui sont aussi des systèmes viables.

Cette manière de faire permet d'aborder la complexité des processus. À chaque niveau on peut prendre en compte les entités et les relations du niveau inférieur sans perdre la *richesse* des interactions inter-niveaux. Aborder ainsi la complexité permet de ne pas négliger les dysfonctionnements provenant des interfaces. En effet, il a été suffisamment prouvé que ceux-ci peuvent avoir de grandes conséquences au niveau du système global (Forrester 1961). Les prendre en compte permet de mettre en évidence des propriétés émergentes que l'on ne pourrait pas modéliser par une désagrégation réductionniste (Morin 1981).

Comme cela a été exprimé auparavant, les produits intelligents dans leurs formes physiques, récupèrent l'information sur leurs états et l'état du système. Cette information sera partagée à chaque instant dans le niveau d'agrégation concerné, lequel évaluera la pertinence d'un changement de décision. Cette évaluation aura l'effet d'un filtrage d'informations, induisant une forme de réduction de la variété du système. De manière plus spécifique, la réduction et l'amplification de la variété seront gérées par l'algorithme coopératif implémenté à chacun des niveaux.

Un des autres avantages de cette approche est que la définition des fonctions de chaque sous-système (activités premières, coordination, surveillance, contrôle, intelligence et politique) définit les spécifications (exigences) technologiques nécessaires à l'implémentation informatique et physique. Ce caractère « informatique et physique » du système, associé au concept de récursivité structurale est par essence même la notion d'holon.

Une des caractéristiques principales du système hybride proposé réside dans le fait que le système central laisse la place aux hommes pour la prise de décision. Les agents de ce niveau garantiront leurs propres objectifs et ceux du système global en prenant en compte les informations issues de la partie distribuée. Pour cela des modèles paramétriques ont dû être utilisés afin d'octroyer des alternatives, pour la mise en œuvre au niveau distribué, qui prennent en compte les changements survenus dans le système physique (Herrera & Thomas 2009a). Ces paramètres peuvent être par exemple : la variation de la capacité du goulot du système, la variation de la demande ou des changements imprévisibles de coûts.

Cette dernière caractéristique a été habituellement négligée par les approches à base d'agents, à part certaines exceptions (Hadeli et al. 2006). A notre avis, ce point est crucial pour assurer la cohérence entre les décisions à moyen et court termes (Herrera & Thomas 2009b).

### 3.2.2 Le produit intelligent comme un système viable

Un produit manufacturé peut être défini comme : *Un objet résultant d'une activité sur des matières premières dans l'objectif de remplir un besoin final*. Ainsi, le produit physique matérialisera son identité uniquement à la fin de son processus de production. Par conséquent, le produit n'existera pas en tant que tel avant que ne soit définie son identité à la fin du processus. Si on considère maintenant le produit en tant qu'objet informationnel, un produit manufacturé aura son identité dès le début de son processus de fabrication. Au cours des étapes intermédiaires correspondant au degré d'avancement de ce processus, le produit matérialisera déjà son identité (en-cours de celui-ci). D'ailleurs, conformément à (Le Moigne 1974) un système est : *Un objet qui, dans un environnement,*

### 3.2. VSM comme cadre de modélisation pour des systèmes contrôlés par le produit ( VSM-SCP )

doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde donc son identité unique.

Alors, en considérant le produit comme un objet informationnel nous avons vu, d'une part, que depuis le début il possède une identité unique qu'il ne perd jamais et qui est entièrement matérialisée à la fin de son processus productif. D'autre part, l'évolution de sa forme physique à chacune de ses étapes de transformation permet de le spécifier dans son environnement. Bien que ces limites soient évolutives au cours de son cycle de vie, la limite avec son environnement peut être définie à chaque étape par le binôme : limite physique/identité. De plus, comme il a été abordé antérieurement, sa structure interne évolue dans le temps en conservant toujours cette identité. Par conséquent, si nous supposons que sa finalité est de *matérialiser celle-ci*, pour définir le « produit comme un système », il nous restera à définir les activités qu'il exerce. Celles-ci seront définies dans la section suivante.

Comme il a été dit dans la section 3.1, un système viable est un système organisé de telle manière qu'il réalise des activités pour survivre dans un environnement changeant, c'est-à-dire un système adaptable. Ceci justifie que nous considérons un produit comme un système viable.

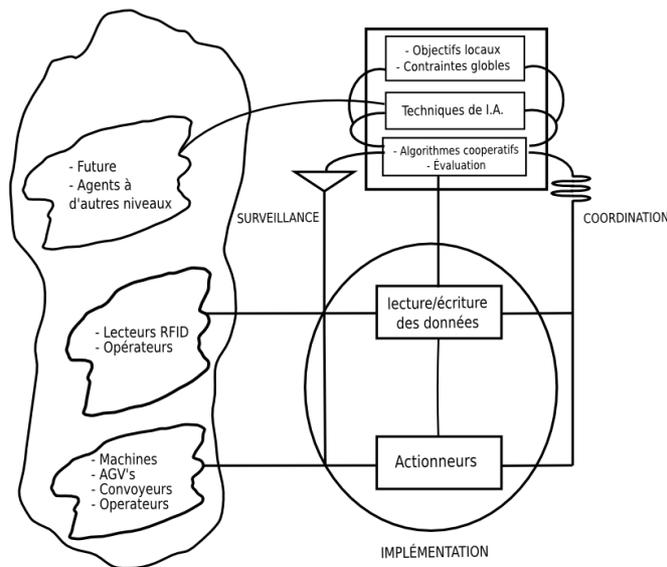


FIGURE 3.5 – Le produit modélisé comme un système viable

Les activités primaires du « système produit » seront la capture d'informations, la mise en œuvre de celles-ci et l'éventuelle action sur l'environnement. L'activité d'entrée et de sortie d'informations (E/S) permet au *système produit* d'obtenir et de donner de l'information de l'environnement et de les répercuter aux autres niveaux récursifs. L'activité des actionneurs permettra au « système produit » d'interagir avec son environnement (mise en œuvre).

Une des fonctions très importantes à ce niveau sera la fonction d'intelligence. Cette fonction peut être implémentée par des algorithmes basés sur des techniques d'intelligence artificielle, comme par exemple des techniques d'apprentissage. C'est grâce à cette

structure et à ces capacités que le *système produit* pourra évoluer. Tout au long de cette évolution la partie informationnelle sera prise en compte et permettra le pilotage de l'évolution du produit physique.

### 3.2.3 Implémentation des systèmes contrôlés par le produit

Il existe de nombreuses alternatives d'implémentation d'un système contrôlé par le produit. Ces variantes de mise en œuvre dépendront des caractéristiques et des objectifs du système de production ainsi que de l'analyse techno-économique correspondante. L'une des technologies qui s'est imposée comme une bonne alternative en termes de coûts/prestations est la technologie RFID (Castagna et al. 2008). Cette technologie fait partie de la classe générale des technologies Auto-ID (Wong et al. 2002). Celles-ci sont d'habitude constituées de deux types de composants : lecteurs et tags, ainsi que d'autres composants intermédiaires nécessaires à l'établissement d'un lien avec le système informatique.

L'un des avantages des systèmes Auto-ID, en plus de son coût réduit en comparaison à d'autres technologies basées sur des capteurs par exemple, est la possibilité de prendre en compte tout le cycle de vie du produit (même jusqu'à son étape de recyclage). L'écroulement des coûts de cette technologie est l'un des principaux facteurs qui ont conduit à l'augmentation de son utilisation dans l'industrie et spécifiquement dans les processus de production (El Haouzi 2008). A contrario, à cause de cet avantage, la mise en œuvre de cette technologie réduit considérablement les capacités du produit intelligent par le fait que les technologies de très bas coût ne permettent pas aujourd'hui de mettre en œuvre des capacités de traitement de l'information (tags passifs en lecture seulement).

Dans ce qui précède, le paradigme de contrôle par le produit a été exclusivement traité d'un point de vue de l'automatique, sans intervention humaine. Cependant, un des défis importants de nos jours est de réussir une relation efficiente entre les hommes et les machines (Te'eni et al. 2007). Bien que les agents montrent une plus grande performance dans des activités de calcul intensif, de recherche et de filtrage d'informations, les humains continuent d'être supérieurs dans des activités de projection et de raisonnement vis-à-vis de situations dynamiques. Ainsi, une autre alternative pour le contrôle du produit dans l'atelier, consistera à mettre en place des interfaces avec lesquelles les opérateurs peuvent interagir avec le système de planification et de pilotage. Ceci permettra de renvoyer à l'opérateur des alternatives de décision (Klein 2008).

## 3.3 Modélisation d'un système PPP hybride contrôlé par le produit ( VSM-SCP-PPP )

Nous avons vu qu'un système de planification et de pilotage de la production (MRP2) comprend en général cinq fonctions principales : le plan stratégique, le Plan Industriel et Commercial (PIC), le Programme Directeur de Production (PDP), l'ordonnancement détaillé et la mise en œuvre. Chacune de ces fonctionnalités (plans) induit des décisions sur différents horizons de planification. Communément ces décisions sont prises sur des horizons glissants, c'est-à-dire, que les plans sont recalculés périodiquement. De cette manière,

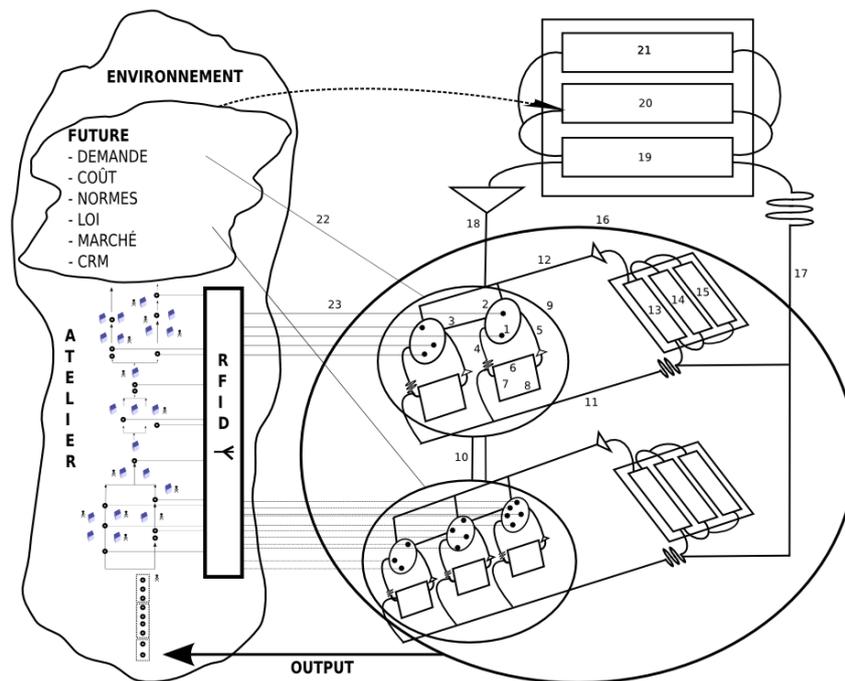


FIGURE 3.6 – Modèle VSM générique pour des systèmes contrôlés par le produit

le plan stratégique peut être revu annuellement, le PIC mensuellement, le PDP toutes les semaines, l'ordonnancement tous les jours et la mise en œuvre en micro-périodes, voire en temps-réel. Toutes ces fonctions concernent, à chaque niveau, différentes agrégations de produits. On trouve respectivement les familles, les produits finis, les composants.

Dans ce contexte, un des problèmes les plus importants est l'ajustement des décisions prises à chacun des niveaux. Lorsque des perturbations, internes ou externes, surviennent les objectifs définis à chacun des niveaux sont difficilement atteignables. Parmi ces perturbations les changements dans la demande (externe) et les variations de la capacité (interne) sont très fréquents. Les modifications de décisions résultantes conduisent à une instabilité du système, laquelle détériore l'efficacité et la productivité.

Aux niveaux de planification moyen et long termes les changements sont relativement peu fréquents. Mais dans le court terme ils le sont beaucoup plus, ce qui dégrade considérablement la performance du système. Dans ce contexte, un ERP doit permettre suffisamment de flexibilité au niveau opérationnel pour permettre des adaptations face à des perturbations, tout en assurant la cohérence avec les objectifs définis aux niveaux supérieurs.

Spécifiquement, notre proposition de spécification du modèle général VSM au contexte particulier du pilotage logistique met en œuvre une fonction de PDP classique avec une fonction de séquençement à capacité finie (lot-streaming). Le PDP définit les quantités à produire par produit (produits finis) sur un horizon de planification au moins égal au délai cumulé le plus long en considérant une demande hebdomadaire ainsi que les coûts et les capacités du système. Cette fonction est généralement formulée par un problème de lotissement à capacité finie (capacity lot-sizing problem). Une fois les quantités par périodes obtenues, celles-ci doivent être divisées en sous lots et séquençées pour être lancées

aux différentes étapes de la production (Sarin & Jaiprakash 2007). De cette manière, il est possible d'optimiser le flux de production en minimisant le délai hebdomadaire de production (makespan). Des perturbations, telles que des changements dans la demande ou des pannes machines, conduisent à ce que le planning défini initialement ne soit plus valide et que par conséquent, il soit nécessaire de le réajuster en fonction des nouvelles conditions.

Notons que le système de prise de décision sera constitué de l'ensemble des fonctions de contrôle, d'intelligence et de politique de tous les niveaux. La nature combinatoire des problèmes de prise de décision et la variabilité des paramètres (demande, coût, capacité, etc) ne permettent pas un recalcul en ligne des plans. Pour faire face à cette limite, la décision centralisée relative aux quantités de production par produit (problème de lotissement) est calculée de façon paramétrique fournissant un ensemble de solutions alternatives.

L'idée principale est de mettre en œuvre un système qui permette de réagir aux perturbations externes (comme les changements de la demande) d'une manière centralisée et aux perturbations internes (comme les changements de capacité) d'une manière distribuée. Celui-ci permettra de prendre en compte la caractéristique d'adaptation, dans le cas de perturbations internes, et si ce n'est pas possible de trouver une solution alternative au niveau concerné, le problème se posera au niveau supérieur (processus bottom-up) et ainsi de suite. Pour les perturbations externes, le système central modifie les seuils des objectifs globaux pour s'adapter de façon top-down en définissant de nouveaux seuils pour les objectifs du niveau inférieur. A l'inverse du processus de décision bottom-up qui a un caractère coopératif, le processus d'ajustement top-down a un caractère coercitif.

La figure 3.7 montre la vision générale du système hybride de planification et pilotage de la production proposé. Ce système a été construit avec l'hypothèse de produits intelligents qui utilisent la technologie RFID pour véhiculer/communiquer les informations.

Le modèle présenté correspond à un système hybride centralisé / distribué qui a pour objectif de faire face aux perturbations internes et externes. Ce système est basé sur une holarchie de produits où, pour respecter le cadre de modélisation VSM, chaque niveau de décision a un rapport avec son niveau d'agrégation. Comme nous l'avons présenté précédemment, les différents niveaux récursifs sont définis comme des communautés d'agents qui devront s'adapter aux conditions de la prise de décision et qui auront pour objectif de collaborer pour cette prise de décision. La figure 3.7 a été divisée en 4 cadrans (I,II,III et IV) pour faciliter les explications.

### **Cadran I : planification/informatique**

Cette partie du système proposé, correspond aux activités de planification qui sont réalisées de façon centralisée ou coopérative. La figure 3.8 décrit en détails ce cadran. La planification s'y décompose en quatre niveaux d'agrégation des « entités produits » .

Cette figure montre les différents niveaux de récursivité proposés. A chacun de ces niveaux, les entités concernées (production dans la semaine, ordres de production, lots et produits) sont modélisées grâce à l'objet de base proposé dans la figure 3.5.

Les produits étant définis comme des agents avec un degré de contrôle/autonomie spécifique, nous nous trouvons face à trois alternatives. Dans un état du système « purement » distribué ou hétérarchique, les agents communiquent uniquement de façon coopé-

### 3.3. Modélisation d'un système PPP hybride contrôlé par le produit ( VSM-SCP-PPP )

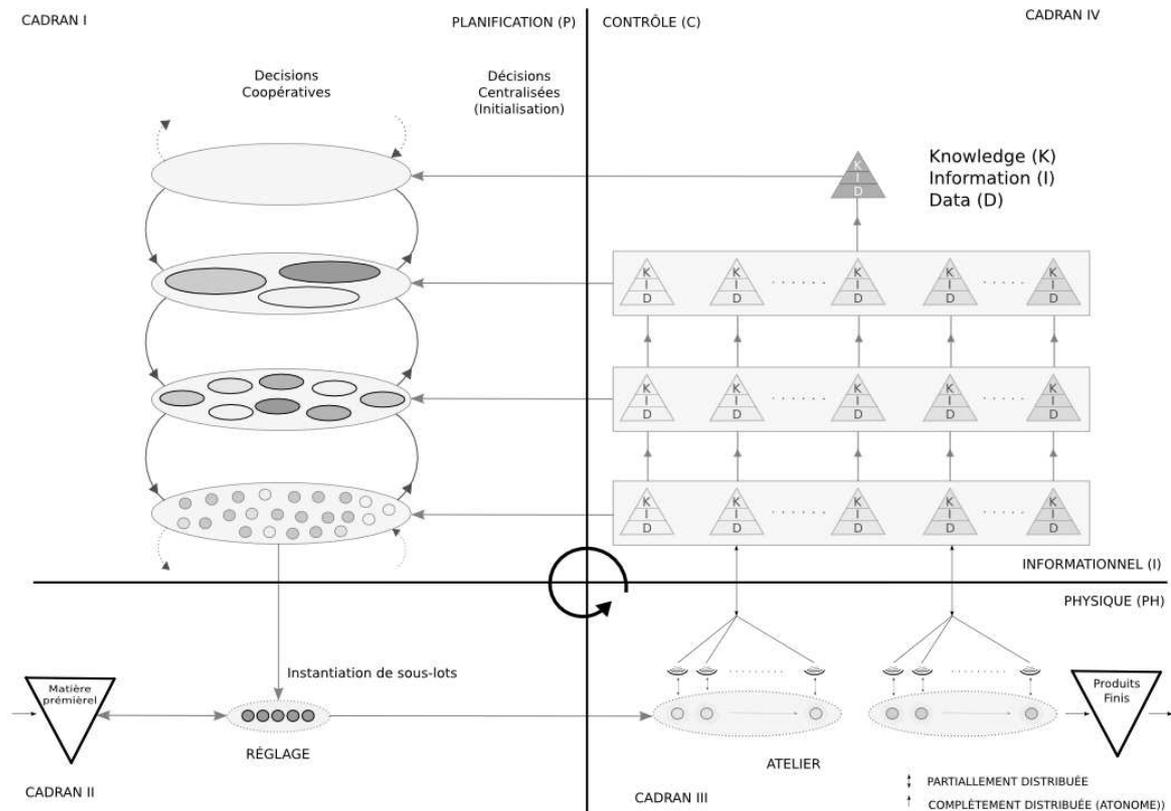


FIGURE 3.7 – Système hybride de planification et pilotage de la production

relative pour prendre les décisions. Au contraire, dans un état du système « purement » centralisé, les décisions sont prises par des méthodes (modèles) que récupèrent des informations auprès des agents, en les agrégeant afin de fournir des décisions centralisées. Entre ces deux extrêmes, le système peut avoir plusieurs combinaisons entre les décisions centralisées et distribuées en permettant le contrôle du degré du contrôle/autonomie désiré.

#### Cadran II : planification/physique

Cette partie correspond à l'instanciation des produits au niveau physique. Chacun des 4 niveaux de prise de décision du cadran I a pu générer des plans pour la mise en œuvre des produits ou de leurs différents agrégats. Étant donné la nature physique/informatique des entités, les produits seront conçus comme des holons dans le cadran II qui embarqueront des fonctions pour développer des caractéristiques comme l'autonomie, leur permettant ainsi d'être en interaction avec l'environnement.

#### Cadran III : contrôle/physique

Dans cette partie, les holons produits (produits intelligents) sont capables d'effectuer des actions par rapport aux événements qui le concernent. Ces produits intelligents ont embarqué des fonctions leur permettant de réagir à des événements les affectant de manière

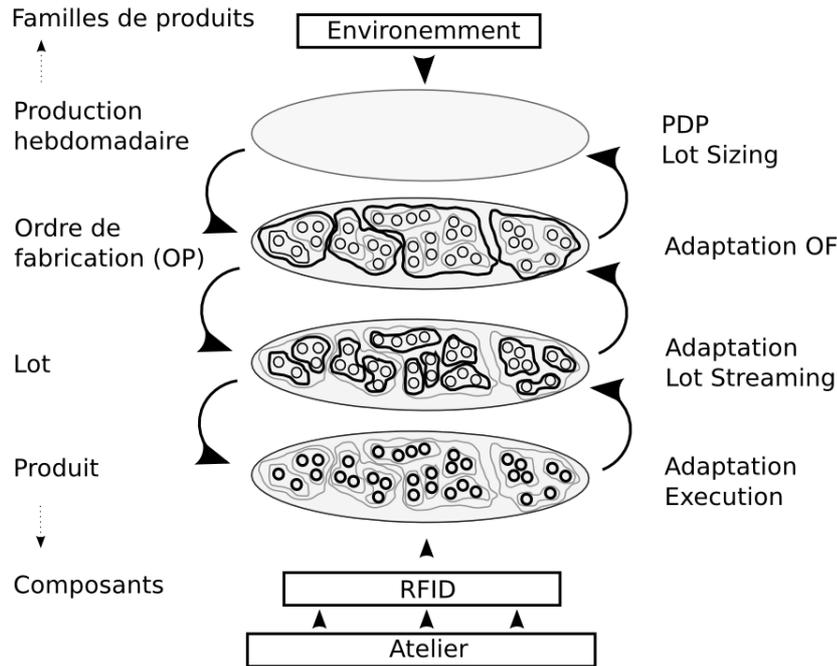


FIGURE 3.8 – Communautés d’agents pour la planification et le contrôle

individuelle ou collective . Ainsi, un produit aura des politiques, fonctions d’intelligence, fonctions de contrôle, et mécanismes de coordination et de communication pour prendre des décisions, en tant que produit ou que composant d’un lot.

#### Cadran IV : contrôle/informatique

La partie *contrôle/informatique* correspond au traitement de l’information récupérée de l’atelier concernant les perturbations et les actions prises par les produits. Ce traitement peut être défini comme un modèle de « Data, Information and Knowledge » (Zins 2007) et de restructuration des données au regard des différents niveaux de traitement. Notons que ce cadran n’a pas été implémenté dans notre étude. Les tables 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 suivantes synthétisent les fonctionnalités du système proposé.

TABLE 3.1 – Description du *niveau produit*

Niveau	Composant	Description
Produit	1	La partie physique de ce composant distribue les informations relatives aux états des produits et du système grâce à des technologies RFID. La relation entre les agents physique et informationnel est du type « un à plusieurs » . L’holon produit évalue et décide de fractionner le lot ou de continuer la production dès lors qu’une perturbation excède un certain niveau pré-établi.

TABLE 3.2 – Description du niveau *lot*

Niveau	Composant	Description
Lot	2	Un agent lot est composé d'un nombre variable d'agents produits. Les agents lots coopèrent pour ajuster la taille et le séquençement du lot concerné par la panne. C'est l'agent produit directement impliqué par la panne qui déclenche le processus de prise de décision.
	3	Il correspond aux flux d'informations entre les agents lots.
	4	La fonction de coordination à ce niveau correspond au protocole de communication entre les agents produits.
	5	Cette fonction met à jour le temps de production du lot à partir des données produits temps réel.
	6	La fonction contrôle met en œuvre un algorithme distribué pour échanger des produits avec d'autres lots.
	7	La fonction intelligence évalue les changements.
	8	La fonction politique à ce niveau respecte la quantité minimale et maximale pour les sous-lots.

TABLE 3.3 – Description du niveau *ordre de fabrication*

Niveau	Composant	Description
Ordre de fabrication	9	Ces agents pilotent une procédure de recherche locale pour trouver des solutions proches de la solution optimale en utilisant des informations paramétriques procurées par le niveau central.
	10	Il correspond au flux d'informations entre les agents ordres de fabrication.
	11	La coordination transmet les résultats de la recherche.
	12	Cette fonction peut déclencher un processus de recalcul des quantités.
	13	La fonction de recherche locale calcule les solutions voisines de la solution optimales en fonction de l'état du système et des alternatives pré-calculées.
	14	La fonction intelligence maintient les informations à jour pour les temps de production concernant chaque ordre de fabrication.
	15	La fonction politique traite des informations concernant les quantités des ordres de fabrication courants.

TABLE 3.4 – La description du niveau des *quantité hebdomadaire de produits*

Niveau	Composant	Description
Système	16	Cet agent représente le niveau le plus élevé incluant tous les autres niveaux. En particulier, cet agent représente toutes les activités implémentées dans l'application proposée.
	17	Dans cette application, ce niveau est implémenté de manière centralisée. La coordination transmet les changements de quantité pour chaque ordre de fabrication
	18	Cette fonction met à jour les informations concernant les quantités des ordres de fabrication.
	19	La fonction de contrôle à ce niveau a trois sous-fonctions : l'évaluation, le modèle paramétrique du PDP et le lot-streaming. (a) la fonction d'évaluation estime la performance globale du système en termes d'efficacité, de stabilité et de faisabilité. (b) Le modèle paramétrique du PDP fournit les alternatives pour les quantités à produire pour chaque produit à chaque période. Les solutions présentent un compromis entre le coût de production et instabilité. Cette fonction est modélisée en utilisant un modèle paramétrique de programmation linéaire en variables mixtes. Ce modèle est calculé hors-ligne, quand les informations des périodes suivantes sont valides. La fonction lot-streaming permet d'obtenir la taille et la séquence des sous-lots en utilisant un modèle linéaire à variables mixtes également.
	20	La fonction intelligence utilise les prévisions pour estimer les paramètres comme la demande et le coût. La demande peut aussi être ajustée en considérant les fonctions de CRM (Customer Relationship Management).
	21	La fonction politique récupère les performances du système en termes de coûts et de stabilité.

### 3.4 Conclusion

Nous venons de présenter le cadre générique de modélisation, point central de notre thèse. Il est possible d'instancier ce cadre à une multitude de contexte. Dans le chapitre suivant, une instanciation particulière à un cas d'étude PPP permettra la définition de chacune des fonctions du modèle. Le cadre de modélisation proposé permet de « flexibiliser » le degré de contrôle/autonomie à chacun des niveaux. Pour cela, la formalisation de chacune des fonctions sera établie après avoir défini la structure et les objectifs du système à contrôler.

# Chapitre 4

## Système hybride centralisé/distribué pour la planification et le pilotage de la production

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Les systèmes PPP et leurs problématiques associées . . . . .</b>	<b>60</b>
4.1.1	Formulation mathématique des mesures pour la nervosité . . .	61
4.1.2	Formulation mathématique de l'instabilité . . . . .	63
<b>4.2</b>	<b>Système hybride centralisé/distribué . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Décisions centralisées niveau PDP . . . . .</b>	<b>65</b>
4.3.1	Un modèle CLSP comme modèle de base . . . . .	65
4.3.2	Modèle pour la réduction de l'instabilité . . . . .	67
<b>4.4</b>	<b>Décisions centralisées niveau lot-streaming . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4.5</b>	<b>Modèle monolithique pour le lot-sizing et le lot-streaming . .</b>	<b>72</b>
<b>4.6</b>	<b>Décisions distribuées au niveau des sous-lots . . . . .</b>	<b>76</b>
4.6.1	Faisabilité de la division des lots . . . . .	78
4.6.2	Évaluation des alternatives . . . . .	79
<b>4.7</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>82</b>

---

Dans chacune des cinq fonctionnalités des systèmes de planification et de pilotage de la production (PPP) dont nous avons parlé, on propose des décisions pour différents horizons de planification en utilisant un horizon glissant. Chacune de ces fonctions prend des décisions portant sur divers niveaux d'agrégation des produits pouvant être des familles de produits, des ordres de fabrication, des lots, des produits finis ou des composants.

Dans ce contexte, l'un des principaux problèmes consiste à maintenir pertinentes les décisions prises aux différents niveaux. Lorsque des perturbations se produisent, les objectifs à chacun de ceux-ci ne sont pas facilement accomplis. Ces perturbations peuvent provoquer des effets indésirables dans la planification. Notons que les changements fréquents de décision peuvent être à l'origine d'une instabilité considérable. En outre, ces effets sont souvent la cause de la perte d'efficacité et de la détérioration de la productivité.

Les changements de courts termes sont plus fréquents et peuvent fortement dégrader les performances du système. Dans ce contexte, un système de PPP doit donner suffisamment de flexibilité au niveau opérationnel tout en assurant la cohérence avec les objectifs définis à d'autres niveaux.

Pour cela, dans ce chapitre nous allons décrire les modèles implémentés dans le système hybride centralisé/distribué. Dans celui-ci certaines décisions peuvent être modifiées de façon dynamique durant la période courante.

Le système aborde deux des quatre niveaux de décision définis dans le chapitre 1 : le niveau tactique et le niveau opérationnel. Le niveau tactique traite des problématiques associées au PDP et le niveau opérationnel le problème de lot-streaming (lotissement et séquençement des lots). Pour autant les modèles proposés correspondront aux trois niveaux du bas du cadre générique VSM du chapitre 3.

Le chapitre est organisé de la manière suivante. La section 4.1 présente la problématique générale abordée par les systèmes de planification et de pilotage de la production. La section 4.2 introduit de façon générale le système hybride centralisé/distribué proposé. La section 4.3 décrit le modèle du niveau de décision centralisé du PDP et la section 4.4 celui du niveau centralisé du lot-streaming. La section 4.5 présente le modèle monolithique pour le lot-sizing et lot-streaming. Enfin la section 4.6 présente la partie distribuée.

## 4.1 Les systèmes PPP et leurs problématiques associées

Rappelons que dans le processus de planification de la production (Vollman et al. 1997) le PDP assigne des quantités de produits finis par périodes sur un horizon de planification donné. Ainsi, le PDP répond précisément à trois questions : quoi, combien et quand produire ? L'objectif est donc de minimiser le coût direct de production qui est au moins constitué des coûts de production, de stockage et de réglage. Il doit ainsi maintenir un niveau adéquat de service au client ainsi que l'efficacité du système de production en utilisant au mieux les ressources critiques.

La méthode la plus commune pour actualiser le PDP est d'utiliser un horizon de planification glissant. Certains des avantages fournis par l'horizon glissant résident dans l'ajustement du « Rough Cut Capacity Planning » qui concerne l'utilisation de ces ressources critiques. Un des inconvénients est, par contre, le manque de flexibilité dans le processus de prise de décision. Selon l'APICS, la flexibilité peut être définie comme *la capacité d'un système de production à répondre rapidement, en volume et en temps, à des changements internes ou externes* (APICS 2008). Ainsi, la flexibilité est nécessaire, pour absorber des perturbations et garantir la faisabilité des plans en faisant généralement participer les opérateurs dans le processus de décision.

Lors de l'utilisation d'un horizon glissant de planification, et précisément après chaque recalcul, les événements qui se produisent rendent soit infaisable, soit détériorent la qualité de la solution préalablement calculée imposant ainsi de nouvelles décisions. Pour augmenter leur réactivité, les décideurs sont amenés à prendre des décisions locales (décentralisées) par manque de temps avec des règles heuristiques (*dispatching rules*). Ces règles sont très

intéressantes du point de vue pratique en raison de leur simplicité d'implémentation et de leur court temps de réponse. Mais rappelons que la performance des décisions des opérateurs dépend fortement de leur visibilité (phénomène de myopie).

De plus, les changements périodiques externes ne permettent pas de réaliser la planification comme elle a été décidée initialement. Par conséquent, la planification est en général utilisée uniquement comme une planification initiale de référence, pour laquelle d'importantes déviations sont souvent constatées. Plusieurs alternatives peuvent être adoptées, bien que seules quelques unes soient capables de maintenir un coût global acceptable. Le but du PDP est alors d'anticiper ces variations pour les limiter.

La table 4.1 (Herrera & Thomas 2009a) montre un exemple de quantités re-planifiées données par le PDP sur un horizon de 8 semaines, où  $Q_{it}^k$  représente la quantité de production programmée pour un produit  $i$ , pour la période  $t$ , obtenue par le PDP calculé dans le cycle  $k$ . Dans cet exemple, l'horizon glissant de planification utilisé recalcule le PDP avec une périodicité spécifique  $\Delta t$  (cycles), qui fournit des quantités de production pour un horizon de planification donné ( $n$ ).

TABLE 4.1 – Exemple d'exécution du PDP dans un horizon glissant pour un produit  $i$

k / t	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$Q_{i1}^1$	$Q_{i2}^1$	$Q_{i3}^1$	$Q_{i4}^1$				
2		$Q_{i2}^2$	$Q_{i3}^2$	$Q_{i4}^2$	$Q_{i5}^2$			
3			$Q_{i3}^3$	$Q_{i4}^3$	$Q_{i5}^3$	$Q_{i6}^3$		
4				$Q_{i4}^4$	$Q_{i5}^4$	$Q_{i6}^4$	$Q_{i7}^4$	
5					$Q_{i5}^5$	$Q_{i6}^5$	$Q_{i7}^5$	$Q_{i8}^5$

La nervosité  $y$  est mesurée par les différences entre les quantités programmées au PDP dans les différents cycles. En considérant l'exemple fourni dans la table 4.1, pour la période  $t = 5$ , la nervosité est égale aux différences entre  $Q_{i5}^5$ ,  $Q_{i5}^4$ ,  $Q_{i5}^3$  et  $Q_{i5}^2$ . Notons qu'au cycle  $k = 5$  la décision finale correspond au  $Q_{i5}^5$  et non aux décisions potentielles précédentes calculées dans le cycle 2, 3 ou 4. Néanmoins, au cycle 2, la planification a été faite sur la base d'une décision potentielle  $Q_{i5}^2$  qui a mené à la commande des matières premières et peut-être même à la planification de la charge correspondante sur certaines machines. Cet exemple montre l'importance de maintenir une certaine cohérence entre les décisions prises à différentes périodes.

Une autre effet indésirable associé au niveau du PDP est l'instabilité des plans. Cet effet est défini comme les différences entre les quantités planifiées dans le même cycle (e.g., dans la table 4.1 for  $k = 2$ , cela correspond aux différences entre  $Q_{i2}^2$ ,  $Q_{i3}^2$ ,  $Q_{i4}^2$ ,  $Q_{i5}^2$ ). La réduction de cet effet d'instabilité des plans est nommé le lissage de la production. Dans la plupart des systèmes de production, les décideurs cherchent à réduire l'instabilité des plans pour réduire les coûts associés aux variations de la charge.

#### 4.1.1 Formulation mathématique des mesures pour la nervosité

Même si l'on trouve plusieurs définitions pour les mesures de nervosité, i.e., (Sridharan et al. 1988, Kimms 1998, Pujawan 2004) et plus récemment (Kabak & Ornek 2009), la

mesure proposée par (Sridharan et al. 1988) reste une des plus utilisées (Zhao & Lam 1997, Xie et al. 2003, Xie et al. 2004). C'est pourquoi, en se basant sur ces travaux, on propose une première mesure de nervosité globale notée  $NG_k$ . Cette mesure correspond à une différence des quantités cumulées, proportionnelle pour toutes les périodes de l'horizon de planification. Cette mesure peut alors être définie comme :

$$NG_k = \max_i \left\{ \frac{1}{O_{ik}} \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{t=k}^{t'} |Q_{it}^k - Q_{it}^{k-l}| \right\}_{i=1}^m, \quad \forall k \geq n, \quad (4.1)$$

où  $t' = k + (n - 1) - l$  et,

- $i$  : produit,
- $t$  : période,
- $k$  : cycle de ré-planification,
- $Q_{it}^k$  : quantité programmée pour le produit  $i$ , dans la période  $t$  dans le cycle  $k$ ,
- $n$  : largeur de l'horizon de planification,
- $O_{ik}$  : volume de demande cumulée du produit  $i$  pour le cycle actuel  $k$  pour tout l'horizon de planification  $k + n$  tel que  $O_{ik} = \sum_{t=k}^{k+n} d_{it}$  où  $d_{it}$  est la demande pour le produit  $i$  dans la période  $t$ .

A la différence des travaux de (Sridharan et al. 1988), dans (4.1) on ne considère pas de poids pour réduire l'importance des décisions postérieures. En particulier, toutes les quantités conduisent potentiellement à des ordres, comme par exemple des ordres d'achat pour les matières premières. Ainsi, la mesure proposée doit considérer toutes les périodes de l'horizon de planification avec le même poids. Elle est définie comme une mesure de nervosité globale et nommée  $NG$ . Elle correspond aux écarts des quantités (entre différents cycles de calcul) rapportés au volume de la demande, obtenant ainsi une estimation proportionnelle de la variation des quantités qui est, à notre avis, plus significative qu'une variation absolue. La spécificité de la mesure proposée est aussi liée au fait qu'elle porte sur le produit le plus nerveux, car effectivement on ne considère que le pire des cas parmi tous les produits.

En plus de cette mesure globale et en raison du court intervalle de re-planification, ( $\Delta t = 1$ ), nous définissons une mesure de nervosité locale pour se focaliser sur une période seulement. Cette mesure est proposée pour aider le décideur à gérer le processus d'approvisionnement de la période correspondante. Ainsi, une indication précise sur le niveau de variation pour chaque ordre d'achat est nécessaire pour minimiser la différence entre ce qui a été commandé et ce dont on a réellement besoin au moment du lancement et donc minimiser les surcoûts de stock ou de rupture. Cette mesure est désignée par  $NL$  et représente les différences de quantités entre le plan actuel et les plans précédents seulement pour la première période dans le cycle correspondant. Comme pour la précédente mesure globale, la mesure locale est proportionnelle au volume de la demande pour avoir des valeurs comparables. Cette mesure est exprimée comme ceci :

$$NL_k = \max_i \left\{ \frac{1}{O_{ik}} \sum_{l=1}^{n-1} |Q_{ik}^k - Q_{ik}^{k-l}| \right\}_{i=1}^m, \quad \forall k \geq n, \quad (4.2)$$

### 4.1.2 Formulation mathématique de l'instabilité

La mesure d'instabilité, comme celle de la nervosité, est déterminée par le pire des cas parmi tous les produits. Ainsi, la mesure d'instabilité peut être formulée comme ci-dessous :

$$I_k = \max_i \left\{ \sum_{t=k}^{t'} |Q_{i(t+1)}^k - Q_{it}^k| \right\}_{i=1}^m, \quad \forall k \geq n. \quad (4.3)$$

Où  $t' = k + n - 1$ .

Cette mesure représente la moyenne des différences de quantités programmées entre chaque période et sa période suivante, à chaque cycle  $k$ . En pratique, dans la réalité industrielle, ces différences ont tendance à être minimisées à cause des coûts associés aux changements relatifs à la gestion des ressources humaines ou des matières premières. Nous avons émis au départ le postulat que nous pouvions réduire la nervosité en minimisant l'instabilité. Effectivement, le lissage des quantités de production les fait tendre vers une quantité moyenne qui sera en général semblable d'un cycle à l'autre, menant ainsi vers une minimisation de la nervosité (Herrera & Thomas 2009a).

Une fois les quantités de produits par période obtenues, il sera nécessaire de les diviser en sous-lots pour assurer une certaine fluidité à l'atelier et ainsi réduire le temps du cycle de production. Ce problème de sous-division de lots est considéré dans la littérature sous l'appellation de « lot-streaming ». Ce problème consiste à générer un nombre de lots de produits identiques devant être fabriqués. Cette méthode permet ainsi de fractionner si nécessaire des lots issus du PDP afin d'autoriser des lancements en parallèles (Sarin & Jaiprakash 2007).

La principale difficulté associée à ce niveau est sa nature combinatoire. La plupart des approches considèrent ce problème de façon statique. Dans ce cas, il est possible d'obtenir une solution optimale. Mais étant donné que le système est affecté constamment par la variation de certains paramètres, cela oblige à de fréquentes replanifications qui conduisent généralement à une importante nervosité et n'assurent pas l'efficacité du système.

## 4.2 Système hybride centralisé/distribué

Sur la base du cadre de modélisation proposé dans la section trois, nous réalisons ici une instantiation du système PPP à deux niveaux. La figure 4.1 montre un schéma du système VSM-SCP-PPP proposé.

Dans le cadran I (planning/informatique) nous considérons les quantités de production par famille provenant du PIC (Belmokhtar et al. 2010) comme les entrées pour le calcul du PDP. Au niveau PDP, nous définissons deux fonctions : a) Initialisation du PDP et b) PDP monolithique. Ces deux fonctions seront détaillées dans la section suivante.

La sortie du niveau PDP correspond à des quantités de produits par période dans l'horizon de planification. Ces quantités devront être divisées en sous-lots avant d'être lancées en production. Cette tâche sera réalisée par une fonction de « lot-streaming centralisée »

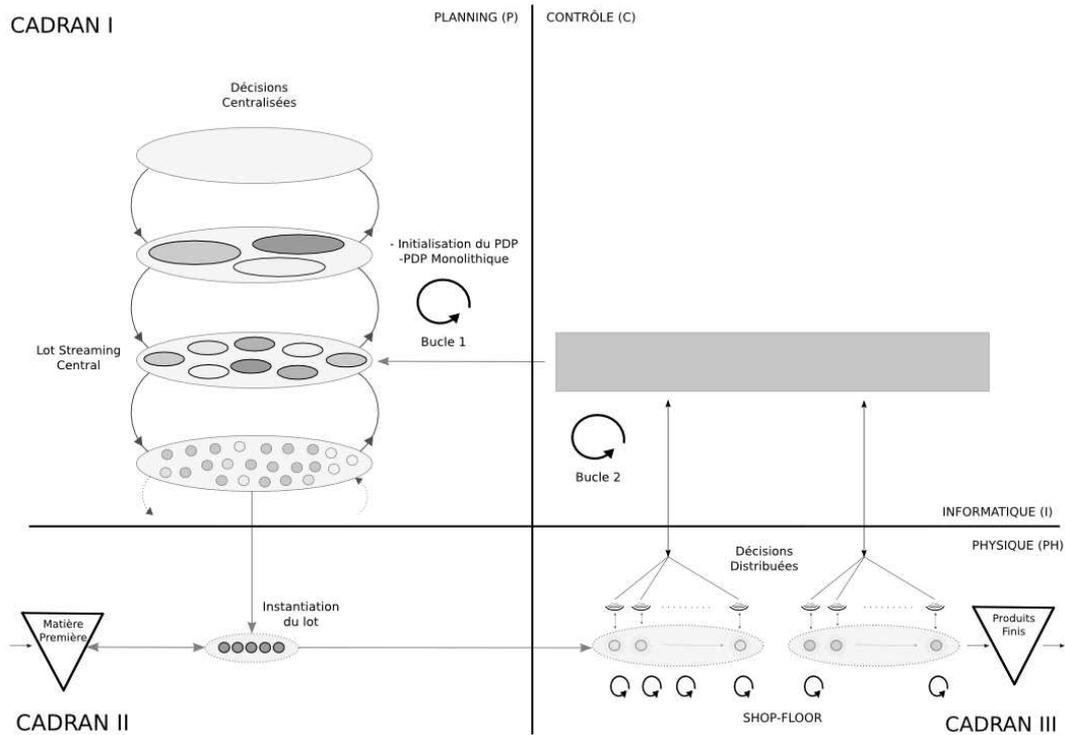


FIGURE 4.1 – Système hybride centralisé/distribué

Le système crée une série de sous-lots et une « séquence virtuelle ». Ce séquençage initial est utilisé pour la génération des holons-produits du premier lot et leur lancement sur le premier poste de charge. Nous verrons dans le chapitre 5, avec plus de détail, que si un événement perturbant significatif est observé, cette « séquence virtuelle » sera remise en cause et remplacera la précédente sans tenir compte du lot en cours de production. Ce lot est alors considéré comme fixé car lancé en production, donc instancié dans le cadran II. Il faut noter que cette instanciation des lots est la fonction qui les matérialise (avant cela les lots ont seulement une représentation informatique).

Les lots, dans leur forme physique, sont composés de produits du même type. Une fois en « production », ils prennent en charge certaines activités de contrôle de l'atelier (cadran III). Dans cette instanciation spécifique, les produits prendront des décisions qui impacteront le lot auquel ils appartiennent. Ainsi, l'holon-produit peut être défini comme montré dans la figure 4.1.

Par la suite, nous décrivons de façon plus spécifique le système hybride proposé. Cela permettra d'avoir une vision plus claire des différents composants et du fonctionnement du système. Au cours du chapitre nous décrirons en détail chacun des composants.

La figure 4.2 montre un diagramme avec les différentes fonctions embarquées dans le système hybride proposé. De façon générale, on démarre une semaine de production avec un premier calcul de PDP (initialisation) pour obtenir une estimation des quantités à faire dans l'horizon de planification. Ensuite, ces quantités serviront d'entrée pour le modèle de lot-streaming qui calcule la taille et l'ordre de passage (séquence) des sous-lots dans la semaine (lot-streaming central).

Ce premier calcul de lot-streaming fournit une durée (makespan), notée  $C_{max}$  qui correspond au temps nécessaire pour produire les quantités définies dans la semaine. Ensuite, un recalcul plus précis des quantités ( $X_{it}$ ) est fait en utilisant une approximation plus exacte de la charge sur la première période. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser un modèle monolithique de lot-sizing et lot-streaming qui est désigné par PDP monolithique. En sortie, nous obtenons un ensemble de plans alternatifs qui permettra aux décideurs de choisir la stratégie à suivre via une interface homme-machine ( $IHM_2$  - figure 4.2). Le nouveau PDP ainsi obtenu permet de relancer un autre recalcul de lot-streaming pour déterminer les tailles et séquences des lots pour la semaine.

Une fois la production lancée, plusieurs types de perturbations peuvent survenir. Celles que nous allons considérer sont inhérentes aux pannes de machines. Pour réagir face à ces pannes, nous proposons de mettre en place des décisions distribuées pour adapter la décision initiale concernant la séquence fixée par le modèle de *lot-streaming central*. Parmi les différentes possibilités à ce niveau, on peut décider de diviser un lot et d'évaluer les solutions possibles. Ces solutions doivent permettre aux opérateurs de choisir la meilleure compte tenu des différents éléments dont ils disposent à ce moment là ( $IHM_0$ ). Il faut noter que chaque perturbation déclenche le processus de décision distribuée. Ce processus décidera de la pertinence de la division d'un lot, mais en laissant la séquence fixe. L'idée est d'adapter le plus possible la dernière séquence de lots choisie, pour ne pas augmenter considérablement la nervosité du système à ce niveau. Toutefois, le « lot-streaming central » cherche en parallèle de nouvelles configurations pour la séquence éventuellement meilleures. Ces solutions seront affichées en ligne pour pouvoir être considérées par les décideurs ( $IHM_1$ ).

Ce processus (Boucle 1) continue jusqu'à atteindre un certain seuil de dégradation du makespan de la séquence courante, ce seuil est noté  $C_{max}$  et il est ajusté au fur et à mesure. Lorsque ce seuil est franchi, il devient nécessaire de déclencher un recalcul de PDP (lot-sizing) pour déterminer les nouvelles quantités par produit à faire dans la semaine (Boucle 2).

## 4.3 Décisions centralisées niveau PDP

Dans cette section, on utilise un modèle CLSP (Capacited Lot-Sizing Problem) pour obtenir une référence pour les indicateurs de performance proposés. En particulier, ce modèle permet de déterminer le coût optimal de production (coût direct) qui sera utilisé comme référence pour trouver un compromis lors de la stabilisation du PDP. Nous proposons une modification du modèle CLSP en variables mixtes pour minimiser en plus du coût de production, l'instabilité engendrée par les écarts des quantités de production sur l'horizon.

### 4.3.1 Un modèle CLSP comme modèle de base

Le modèle conventionnel CLSP est noté  $M_P$  et sa fonction objectif notée  $f_P$ . Ce modèle est utilisé pour obtenir la valeur optimale, d'une part, et pour déterminer un seuil de détérioration acceptable pour réduire l'instabilité, d'autre part. Dans la suite, nous

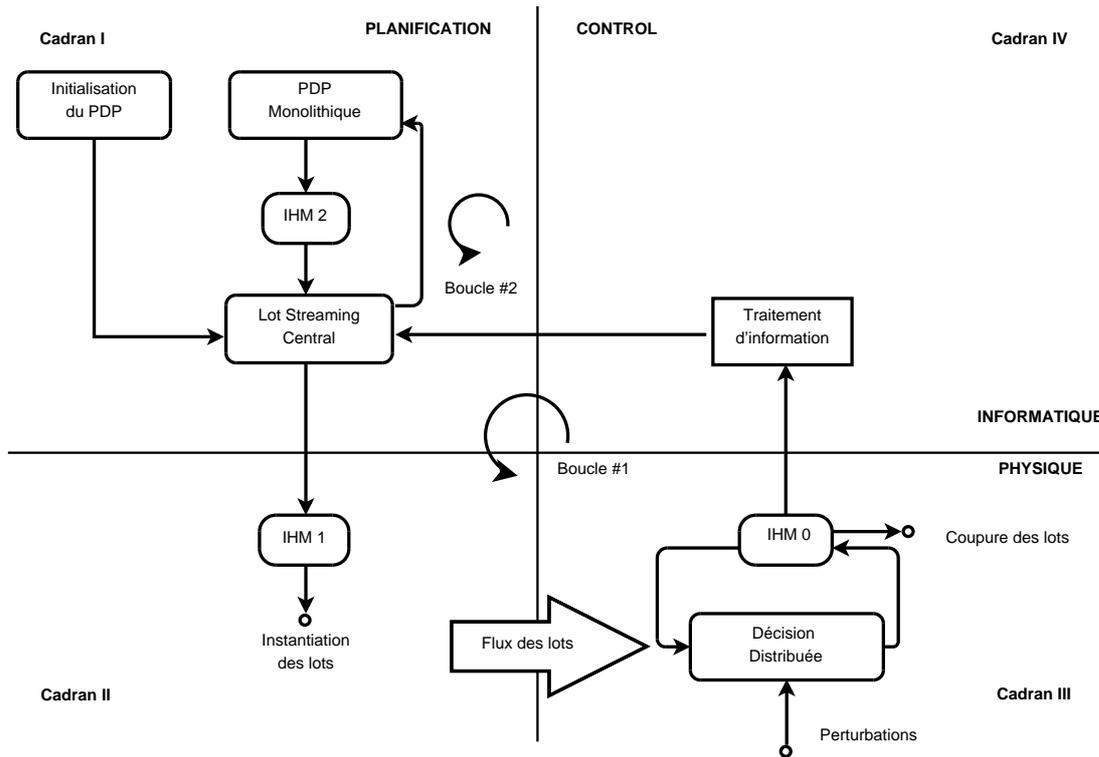


FIGURE 4.2 – Fonctions du système

décrivons la notation des variables et paramètres utilisés :

### Variables

- $x_{it}$  : quantité de production pour le produit  $i$  à la période  $t$ ,
- $s_{it}$  : stock du produit  $i$  à la période  $t$ ,
- $r_{it}$  : retard du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $y_{it}$  : réglage de  $i$  dans la période  $t$  ( $y_{it} = 1 \iff x_{it} > 0, \forall i, \forall t$ ),
- $w_{it}$  : variable de lissage de la production pour le produit  $i$  dans la période  $t : t > 1$ .

### Input data

- $d_{it}$  : demande du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $p_{it}$  : coût de production du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $h_{it}$  : coût de stock du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $b_{it}$  : coût de retard du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $q_{it}$  : coût de réglage du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $C_t$  : capacité disponible du goulot dans la période  $t$ ,
- $\alpha_i$  : consommation marginale de capacité par production du produit  $i$ ,
- $\beta_i$  : consommation marginale de capacité par réglage du produit  $i$ ,
- $M$  : borne supérieure de production

$$(MP) \quad \min f_P^k = \sum_{i=1}^m \sum_{t=k}^{t'} (p_{it}x_{it} + h_{it}s_{it} + b_{it}r_{it} + q_{it}y_{it}) \quad (4.4)$$

$$s_{i0} = s_{ini}, \quad r_{i0} = r_{ini}, \quad i \in [1, \dots, m] \quad (4.5)$$

$$s_{it'} = 0, \quad r_{it'} = 0, \quad i \in [1, \dots, m] \quad (4.6)$$

$$s_{i(t-1)} - r_{i(t-1)} + x_{it} = d_{it} + s_{it} - r_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.7)$$

$$x_{it} \leq My_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.8)$$

$$\sum_{i=0}^m \alpha_i x_{it} + \beta_i y_{it} \leq C_t, \quad t \in [k, \dots, t'] \quad (4.9)$$

$$x_{it}, s_{it}, r_{it} \geq 0, y_{it} \in \{0, 1\} \quad (4.10)$$

L'intervalle des périodes  $[k, \dots, t']$  et  $k$ -index dans chaque fonction, ont été choisis de manière explicite pour spécifier l'horizon glissant dans lequel le modèle est calculé. Tel que,  $k$  et  $t' = k + n - 1$  représentent respectivement la première et la dernière période dans l'horizon de planification.

Le modèle retenu prend en compte quatre types de variables : les quantités de production, les stocks, les retards et les réglages pour chaque produit à chaque période de l'horizon. La fonction objectif (4.4) minimise la somme des coûts associés. Les contraintes (4.5) et (4.6) fixent les variables initiales du stock et retard provenant de la période antérieure. Les contraintes (4.7) représentent la conservation du stock. Les inégalités (4.8) représentent la relation entre production et réglage ( $y_{it} = 1 \iff x_{it} > 0$ ) et (4.9) définissent la capacité par période.

### 4.3.2 Modèle pour la réduction de l'instabilité

La littérature comporte un volume important de travaux de recherche étudiant l'effet de la nervosité dans un environnement MRP. Ainsi, il existe plusieurs définitions de la stabilité et la nervosité. Plus généralement, les contributions qui concernent les aspects liés à la nervosité proposent d'utiliser des méthodes approximatives telles que les horizons gelés, en planifiant des clôtures ou en dépêchant des règles. Les intervalles gelés s'appliquent en fixant des quantités pour quelques périodes de planification dans lesquelles tout changement est interdit (Sridharan & Berry 1990). Les bornes de planification (time fences) imposent des règles de gestion strictes permettant quelques changements seulement pour quelques futures périodes (Vollman et al. 1997) et des stocks de sécurité pour absorber l'incertitude de la demande (Kropp et al. 1979).

Il existe de nombreux travaux qui analysent l'efficacité de ces procédures dans des systèmes MRP au niveau du PDP (Sridharan & LaForge 1990, Kadipasaoglu & Sridharan 1995, Zhao & Lam 1997). L'évaluation de ces procédures est souvent utilisée avec des méthodes de lotissement dynamiques comme la méthode Wagner-Within (Blackburn et al. 1982a) ou des algorithmes de type Silver-Meal (Blackburn et al. 1982b).

Toutefois, peu de travaux basés sur des approches exactes ont été proposés pour réduire la nervosité ou l'instabilité. A notre connaissance, il y a seulement deux travaux qui

considèrent l'optimisation de leur réduction. Les premiers travaux Kimms (1998) considèrent l'impact de l'instabilité en utilisant trois modèles de PLNE de planification de production. L'auteur propose plusieurs mesures pour la stabilité obtenue sur la base de la formulation utilisée pour obtenir les solutions du PDP. Aussi, les effets pour différentes structures de coût sont simulés et analysés. Finalement, il propose une méthode itérative pour réduire la nervosité du PDP. Les seconds travaux sont ceux de (Kazan et al. 2000) où les auteurs proposent trois méthodes pour réduire la nervosité du PDP. Deux de ces méthodes correspondent aux versions modifiées des méthodes Wagner-Within et de la méthode du Silver-Meal. La troisième méthode est basée sur un modèle PLNE qui minimise les différences avec les quantités des périodes programmées précédemment. Les résultats numériques ont montré que le modèle PLNE proposé améliore la nervosité sauf dans certains cas particuliers.

L'inconvénient principal des approches conventionnelles réside dans leur incapacité à réagir face aux changements jusqu'à la prochaine planification. En effet, quand les perturbations se produisent, le plan proposé devient sous-optimal (lancement de lots additionnels pour lesquels on constatera une augmentation du coût) ou infaisable (capacité insuffisante).

Ainsi, l'instabilité est introduite dans la formulation en pénalisant les variations dans les quantités de production planifiées pour chaque période, pour tous les produits. Ce modèle est défini comme suit :

$$(M_I) \quad \min f_I^k = f_P^k + \phi \sum_{i=1}^m \sum_{t=2}^n w_{it} \quad (4.11)$$

$$s_{i0} = s_{ini}, \quad r_{i0} = r_{ini}, \quad i \in [1, \dots, m] \quad (4.12)$$

$$s_{it'} = 0, \quad r_{it'} = 0, \quad i \in [1, \dots, m] \quad (4.13)$$

$$s_{i(t-1)} - r_{i(t-1)} + x_{it} = d_{it} + s_{it} - r_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.14)$$

$$x_{it} \leq M y_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=0}^m \alpha_i x_{it} + \beta_i y_{it} \leq C_t, \quad t \in [k, \dots, t'] \quad (4.16)$$

$$x_{i(t+1)} - x_{it} \leq w_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.17)$$

$$x_{it} - x_{i(t+1)} \leq w_{it}, \quad i \in [1, \dots, m], t \in [k, \dots, t'] \quad (4.18)$$

$$x_{it}, s_{it}, r_{it}, w_{it} \geq 0, y_{it} \in \{0, 1\} \quad (4.19)$$

Dans la formulation proposée, nous ajoutons des variables  $w_{it}$ . Ces variables correspondent aux variations entre deux périodes consécutives. La fonction objectif (4.11) minimise, d'une part, le coût de production direct et, d'autre part, les différences entre les quantités planifiées pour l'ensemble des produits sur l'horizon. Les contraintes (4.17) et (4.18) représentent la différence entre les quantités en valeur absolue.

Ce modèle est embarqué dans la fonction *initialisation du PDP* comme le montre la figure 4.3.

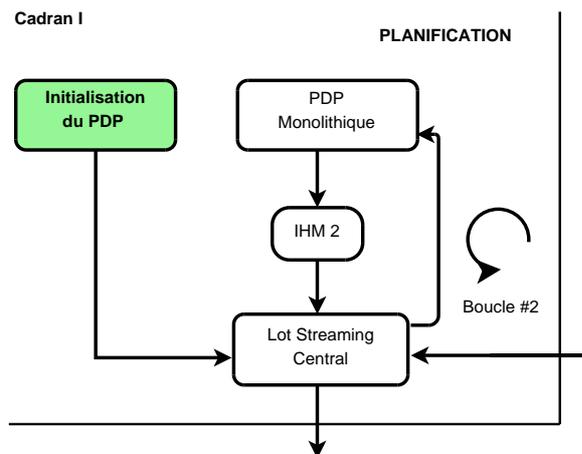


FIGURE 4.3 – Initialisation du PDP

## 4.4 Décisions centralisées niveau lot-streaming

La formulation d'un problème de lot-streaming doit prendre en compte nécessairement la configuration physique de l'atelier. Ainsi, dans nos travaux nous développons une configuration générique d'atelier qui nous servira de cadre pour valider notre approche dans le chapitre 5. La configuration d'atelier que nous considérons est organisée selon un système flow-shop hybride qui dispose de deux étapes de production en série, avec un stock intermédiaire, dans lesquelles les pièces passent une à une. La première étape de production contient un module de production ( $A$ ) (comprenant une ou plusieurs phases de production) et le deuxième module ( $B$ ) avec  $K$  sous-modules en parallèle (aussi comportent une ou plusieurs phases) (voir figures 5.1 et 5.2).

### Modèle de lot-streaming pour un 1/ $K$ hybrid flow-shop

Le problème de lot-streaming abordé dans nos travaux, consiste à diviser les quantités à produire de chaque produit dans la période (résultant du PDP) en des sous-lots pour réduire la durée totale du séquençement (makespan). Les sous-lots sont restreints par des quantités minimales (définis de façon arbitraire). De cette façon, conformément au classement donné par (Sarin & Jaiprakash 2007), ce problème correspond à un problème KP/ $N$ / $V$ / $II$ / $CV$ . Cela signifie  $K$  machines en parallèle, avec  $N$  lots tels que les sous-lots sont de tailles variables. Le  $II$  signifie qu'un temps d'inactivité est permis entre le processus des lots consécutifs et  $CV$  signifie que la taille des sous-lots est continue. Le modèle développé est le suivant :

## Paramètres

$X_l$	:	quantité de pièces par lot $l$ ,
$QMIN_l$	:	taille minimale de sous-lots pour le lot $l$ ,
$TPA_l$	:	temps de production unitaire à $A$ pour un produit du lot $l$ ,
$TPB_l$	:	temps de production unitaire à $B$ pour un produit du lot $l$ ,
$SA_l$	:	temps de setup à l'étape $A$ pour tout sous-lots dans le lot $l$ ,
$SB_l$	:	temps de setup à l'étape $B$ pour tout sous-lots dans le lot $l$ ,
$L$	:	nombre de lots,
$n_l = \lfloor Q_l/q_l \rfloor$	:	nombre maximum de sous-lots dans le lot $l = 1, \dots, L$ ,
$I = \sum_{l=1}^L n_l$	:	nombre total de sous-lots,
$J = I$	:	nombre de positions dans la séquence,
$K$	:	nombre de sous-modules à $B$ .

## Indices

$l = 1, 2, \dots, L$	:	lots,
$i = 1, 2, \dots, I$	:	sous-lots,
$j = 1, 2, \dots, J$	:	positions dans la séquence,
$k = 1, 2, \dots, K$	:	sous-modules.

## Variables

$x_{ijk}$	:	quantité du sous-lot $i$ dans la position $j$ affecté au sous-module $k$ ,
$y_{ijk}$	:	1 if $x_{ijk} > 0$ . 0 o.c,
$STA_j$	:	temps de début dans l'étape $A$ du lot dans la position $j$ ,
$STB_{jk}$	:	temps de début dans l'étape $B$ du lot dans la position $j$ affecté au sous-module $k$ ,

## Modèle

$$\begin{aligned}
 (M_{LS}) \quad & \min \quad C_{\max} \\
 & \text{s.t.}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

$$\sum_{i \in n_l} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} = X_l, \quad \forall l. \quad (4.21)$$

$$x_{ijk} \leq X_l \cdot y_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.22)$$

$$x_{ijk} \geq QMIN_l \cdot y_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.23)$$

$$STA_1 = 0. \quad (4.24)$$

$$STA_j = STA_{j-1} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} \sum_{k=1}^K TPA_l \cdot x_{i(j-1)k} + SA_l \cdot y_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1. \quad (4.25)$$

$$STB_{1k} = \sum_{i \in n_l} \sum_{k=1}^K TPA_l \cdot y_{i1k} 0, \quad \forall l, \forall k. \quad (4.26)$$

$$STB_{jk} \geq STA_j + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPA_l \cdot y_{ijk}, \quad \forall j, \forall k. \quad (4.27)$$

$$STB_{jk} \geq STB_{(j-1)k'}, \quad \forall j : j > 1, \forall k, \forall k' : k \neq k' \quad (4.28)$$

$$STB_{jk} \geq STB_{(j-1)k} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot x_{i(j-1)k} + SB_l \cdot y_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1, \forall k. \quad (4.29)$$

$$Cmax \geq STB_{Jk} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot x_{iJk} + SB_l \cdot y_{i(J)k}, \quad \forall k. \quad (4.30)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K y_{ijk} = 1, \quad \forall j. \quad (4.31)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K y_{ijk} = 1, \quad \forall i. \quad (4.32)$$

$$x_{ijk}, STA_j, STB_{jk}, Cmax \geq 0, y \in \{0, 1\}, \forall i, \forall j, \forall k; . \quad (4.33)$$

D'abord, il faut noter que la quantité à produire dans la période ( $x_{it}$ ), résultante du modèle de P ( $M_I$ ) devient une des entrées (paramètre) du modèle de lot-streaming ( $M_{LS}$ ). Dans ce modèle nous appellerons ce paramètre : quantité de pièces par lot ( $X_l$ ). Les sous-lots correspondront aux quantités déjà divisées.

Comme nous ne connaissons pas le nombre optimal de sous-lots à l'avance, nous en déduisons le nombre maximum de ceux-ci en divisant la quantité de pièces par lot ( $X_l$ ) par sa taille minimale ( $QMIN_l$ ). Alors, l'idée du modèle est de « remplir » certains de ces sous-lots pour réaliser la production totale définie par les lots. Les sous-lots « vides » ne compteront pas dans la séquence finale.

La fonction objectif (4.20) minimise la durée du séquençement qui est déterminée par la date de fin de la dernière pièce (makespan). Les contraintes (4.21) garantissent que la somme des quantités de production des sous-lots soit égale à la quantité de pièces par lot ( $X_l$ ). Les contraintes (4.22) fixent la variable de réglage en cas de production du sous-lot du produit considéré. Les contraintes (4.23) assurent une taille minimale pour les sous-lots. Le temps de début du sous-lot dans la position  $j$  est fixé à 0 par la contrainte (4.24). La relation récursive dans les contraintes (4.25) exprime que le temps de début à

l'étape  $A$  du sous-lot dans la  $j$ -ème position doit être égal au temps de début du sous-lot précédent (le sous-lot dans la position  $j - 1$ ) plus son temps de réglage et de production. Les contraintes (4.26) établissent le temps de début du sous-lot dans la première position de la séquence à une valeur égale au temps de production unitaire dans le module  $A$  (du produit correspondant) dans n'importe quel sous-module du module  $B$ . Les contraintes (4.27) assurent que le temps de début sur ( $B$ ) sera toujours plus grand que le temps de début sur  $A$  plus le temps de production unitaire dans le module  $A$  (du produit correspondant). Étant donné l'existence d'un stock intermédiaire entre les deux modules, les contraintes (4.28) assurent une politique du type FIFO pour les lots entrants au module  $B$ . Cette dernière contrainte est nécessaire pour empêcher le fait que le modèle puisse éventuellement laisser en attente trop longtemps des lots en stock. Les contraintes (4.29) définissent le temps de début du lot dans la position  $j$  sur le module  $B$ . À part pour le premier, le temps de début doit être supérieur ou égal à la valeur maximale entre le temps de sortie de la première pièce sur  $A$  et le temps de fin du sous-lot précédent sur le sous-module du module  $B$  concerné. Le makespan est défini par la contrainte (4.30) comme étant déterminé par le plus long des temps de fin des sous-lots au module  $B$ . Les contraintes (4.31) et (4.32) imposent l'affectation de chaque sous-lot à une position dans la séquence et seulement à un sous-module de  $B$ . Finalement, la contrainte (4.33) permet de définir les types des variables. Ce modèle est implémenté dans la fonction *lot-streaming central* comme montre la figure 4.4.

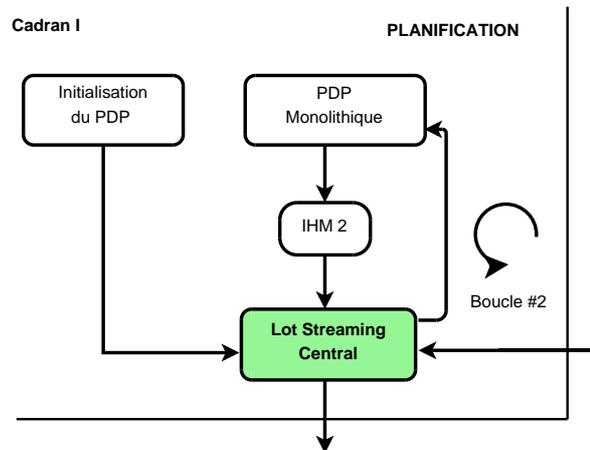


FIGURE 4.4 – Lot-streaming central

## 4.5 Modèle monolithique pour le lot-sizing et le lot-streaming

À ce point de notre proposition, nous avons défini les fonctions centralisées qui permettent de calculer les quantités par produit fini dans la semaine et aussi la méthode pour diviser et séquencer ces quantités en sous-lots. Notons qu'une prise en compte des ajustements de capacité devient nécessaire en raison des perturbations considérées. Cette

problématique a été abordée par Dauzère-Pérès & Lasserre (2002). Dans ces travaux, les auteurs soulignent le fait que dans la plupart des approches hiérarchiques de PPP, le processus de désagrégation des plans ne considère pas « les détails ». Ces « détails » correspondent essentiellement à des approximations dans le calcul des paramètres du système. Spécifiquement, les auteurs déterminent une capacité théorique approchée résultante d'une approximation de la charge utilisée dans le calcul du PDP. Ils démontrent qu'une mauvaise approximation peut induire d'importantes erreurs dans la planification. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent un modèle monolithique qui intègre le problème de lot-sizing et d'ordonnancement. Vu la complexité (explosion combinatoire) induite par cette agrégation, le modèle est calculé de façon itérative en fixant les lots ou la séquence.

Dans notre cas, ce point est très important parce que l'objectif est d'actualiser au cours de la période les quantités de production. Ce processus est déclenché lorsque le cumul des variations de la charge atteint un certain seuil. Il est évident alors qu'une approximation trop grossière de celle-ci conduirait nécessairement à un comportement insatisfaisant. Le modèle monolithique est implémenté dans la fonction *PDP Monolithique* comme le montre la figure 4.5.

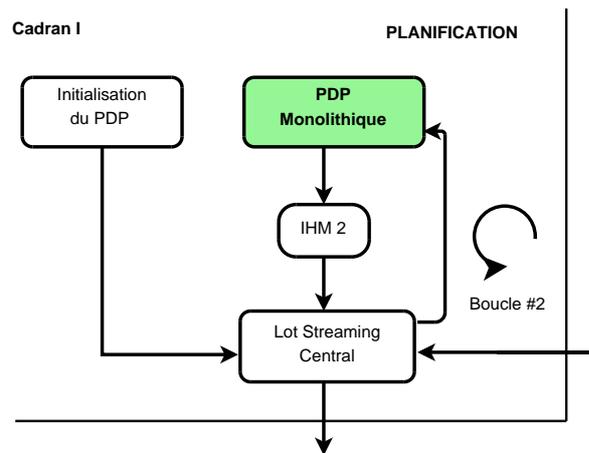


FIGURE 4.5 – PDP Monolithique

Le modèle est décrit ci-dessous :

### Indices

- $l = 1, 2, \dots, L$  : lots,
- $i = 1, 2, \dots, I$  : sous-lots,
- $j = 1, 2, \dots, J$  : position dans la séquence,
- $k = 1, 2, \dots, K$  : sous-modules.

### Variables lot-sizing

- $X_{it}$  : quantité du produit  $i$  à la période  $t$ ,
- $s_{it}$  : stock du produit  $i$  à la période  $t$ ,
- $r_{it}$  : retard du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $y_{it}$  : réglage du produit  $i$  dans la période  $t$  ( $y_{it} = 1 \iff x_{it} > 0, \forall i, \forall t$ ),
- $w_{it}$  : variable de lissage de la production pour le produit  $i$  dans la période  $t : t > 1$ .

### Variables lot-streaming

- $x_{ijk}$  : taille du sous-lot  $i$  dans la position  $j$  (ordre) affectée au sous-module  $k$ ,
- $z_{ijk}$  : variable auxiliaire binaire pour ne pas compter un réglage lorsque le sous-lot correspondant est annulé (les variables initiales  $y_{ijk}$  étant maintenant fixées comme paramètres d'entrée  $yf_{ijk}$ ).
- $STA_j$  : temps de début au module  $A$  du sous-lot dans la position  $j$ .
- $STB_{jk}$  : temps de début au module  $B$  du sous-lot dans la position  $j$  affectée au sous-module  $k$ .

### Paramètres lot-sizing

- $d_{it}$  : demande pour le produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $p_{it}$  : coût de production du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $h_{it}$  : coût de stock du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $b_{it}$  : coût de retard du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $q_{it}$  : coût de réglage du produit  $i$  dans la période  $t$ ,
- $C_t$  : capacité disponible dans la période  $t$ ,
- $M$  : borne supérieure de production
- $\mathbf{XF}_i$  : **quantité déjà faite du produit  $i$  dans la période 1**

### Paramètres lot-streaming

- $Q_l$  : quantité de production du produit  $l$ ,
- $q_l$  : taille minimum des sous-lot du produit  $l$ ,
- $TPA_l$  : temps d'exécution unitaire dans  $A$  du produit  $l$ ,
- $TPB_l$  : temps d'exécution unitaire dans  $B$  du produit  $l$ ,
- $SA_l$  : temps de réglage au module  $A$  du produit  $l$ ,
- $SB_l$  : temps de réglage au module  $B$  du produit  $l$ ,
- $L$  : nombre de produits,
- $n_l = \lfloor Q_l/q_l \rfloor$  : nombre maximum de sous-lots pour le produit  $l = 1, \dots, L$ ,
- $I = \sum_{l=1}^L n_l$  : nombre maximum de sous-lots,
- $J = I$  : nombre maximum de positions dans la séquence,
- $K$  : nombre de sous-modules,
- $C$  : capacité disponible pour la période courante au moment du recalcul,
- $\mathbf{yf}_{ijk}$  : **séquence fixée.**

$$(M_{MLS}) \quad \min f_I = f_P + \phi \sum_{l=1}^m \sum_{t=2}^n w_{lt} \quad (4.34)$$

$$s_{l0} = s_{ini}, r_{l0} = r_{ini}, \quad l \in [1, \dots, m] \quad (4.35)$$

$$s_{lt'} = 0, r_{lt'} = 0, \quad l \in [1, \dots, m] \quad (4.36)$$

$$s_{l(t-1)} - r_{l(t-1)} + X_{lt} = d_{lt} + s_{lt} - r_{lt}, \quad l \in [1, \dots, m], t \in [1, \dots, n] \quad (4.37)$$

$$X_{l0} \geq XF_l, \quad l \in [1, \dots, m] \quad (4.38)$$

$$X_{lt} \leq M \cdot y_{lt}, \quad l \in [1, \dots, m], t \in [1, \dots, n] \quad (4.39)$$

$$\sum_{l=0}^m TPA_l \cdot X_{lt} + S \cdot SA_l \cdot y_{lt} + \epsilon \leq C_t, \quad t \in [2, \dots, n] \quad (4.40)$$

$$X_{l(t+1)} - X_{lt} \leq w_{lt}, \quad l \in [1, \dots, m], t \in [1, \dots, n] \quad (4.41)$$

$$X_{lt} - X_{l(t+1)} \leq w_{lt}, \quad l \in [1, \dots, m], t \in [1, \dots, n] \quad (4.42)$$

$$\sum_{i \in n_l} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} = (X_{l0} - XF_l), \quad \forall l. \quad (4.43)$$

$$x_{ijk} \geq (q_l \cdot yf_{ijk}) \cdot z_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.44)$$

$$x_{ijk} \leq M \cdot yf_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.45)$$

$$x_{ijk} \leq M \cdot z_{ijk}, \quad \forall i, \forall j, \forall k, \quad (4.46)$$

$$z_{ijk} \leq x_{ijk}, \quad \forall i, \forall j, \forall k, \quad (4.47)$$

$$STA_1 = 0. \quad (4.48)$$

$$STA_j = STA_{j-1} + \sum_{i \in n_l} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K TPA_l \cdot x_{i(j-1)k} + (SA_l \cdot yf_{i(j-1)k}) \cdot z_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1. \quad (4.49)$$

$$STB_{1k} = 0, \quad \forall k. \quad (4.50)$$

$$STB_{jk} \geq STB_{(j-1)k'}, \quad \forall j : j > 1, \forall k, \forall k' : k \neq k' \quad (4.51)$$

$$STB_{jk} \geq STA_j + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPA_l \cdot y_{ijk}, \quad \forall j, \forall k. \quad (4.52)$$

$$STB_{jk} \geq STB_{(j-1)k} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot x_{i(j-1)k} + (SB_l \cdot yf_{i(j-1)k}) \cdot z_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1, \forall k. \quad (4.53)$$

$$C \geq STB_{Jk} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot x_{iJk} + (SB_l \cdot yf_{iJk}) \cdot z_{iJk}, \quad \forall k. \quad (4.54)$$

$$X_{lt}, s_{lt}, r_{lt}, w_{lt} \geq 0, y_{lt} \in \{0, 1\}, x_{ijk}, STA_j, STB_{jk}, C \geq 0, z_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (4.55)$$

L'idée principale de ce modèle est donc de prendre en compte une approximation de la charge pour la première période.

Le modèle est initialisé par le résultat du calcul du modèle de lot-streaming centralisé ( $M_{LS}$ ). A la suite de perturbations ayant conduit à la remise en cause de la séquence, un recalcul est fait prenant comme paramètre la dernière séquence optimale ( $yf_{ijk}$ ) obtenue.

Plus précisément, le modèle recalcule les nouvelles tailles de lots ( $X_{it}$ ) et des sous-lots  $x_{ijk}$ . Compte tenu de la réduction de capacité, certains sous-lots peuvent être supprimés dans la nouvelle solution en maintenant la séquence fixe, d'autres sous-lots pouvant changer uniquement de taille.

Rappelons que dans la configuration de l'atelier, nous avons deux étapes de production en série, la deuxième comprenant  $K$  sous-modules en parallèle. Nous sommes donc en présence, à cause de  $B$ , de la contrainte suivante :

$$\sum_{i=0}^m TPA_i \cdot X_{it} + S \cdot SA_i \cdot y_{it} + \xi \leq C_t, \quad t \in [k, \dots, t'],$$

Contrairement à la charge de la période courante qui est calculée précisément, la charge des périodes futures (à partir du cycle suivant  $t = 2, \dots, n$ ) est approchée par la somme des temps de production plus le temps de réglage des lots sur  $A$  (ceci en fonction du nombre moyen de sous-lots ( $S$ ) dans la séquence afin d'améliorer la qualité de l'approximation de la charge). Le temps de production sur  $B$ , une fois que toute la production est passée sur  $A$ , est approché par le paramètre  $\xi$ . Ce paramètre représente le temps de réglage et de production qui reste à faire sur  $B$  (son temps d'attente en stock inclus) et ce pour les périodes à venir. Il est déterminé et mis à jour par le calcul du modèle de lot-streaming centralisé. Le reste du modèle est décrit ci-dessous :

La contrainte (4.38) assure que la nouvelle quantité totale pour toute la première période ( $X_{0l}$ ) prend bien en compte la quantité déjà faite dans cette période ( $XF_l$ ). Ainsi, la quantité qui reste à faire pour répondre à la demande est donnée par la différence entre  $X_{0l} - XF_l$ . La contrainte (4.43) garantit que la somme de tous les sous-lots appartenant à un même lot doit être égale à la quantité qui reste à faire (différence précédente). La contrainte (4.44) assure de produire des sous-lots de tailles au moins correspondant à la taille minimum. La contrainte (4.45) exprime qu'un sous-lot ne peut exister que si le lot correspondant existe dans la séquence. Les contraintes (4.46) et (4.47) permettent de créer une variable auxiliaire  $z_{ijk}$  qui prendra la valeur 0 quand la quantité  $x_{ijk}$  est mise à 0 signifiant la suppression du sous-lot en question. En effet, ces deux dernières contraintes permettent d'annuler éventuellement certains sous-lots à l'issue d'un recalcul et de ne pas prendre en compte son temps de réglage. En conséquence, les contraintes (4.49), (4.51), (4.52) et (4.53) servent à obtenir un calcul ajusté de charge pour la première période en considérant cette possibilité d'annulation des sous-lots. Enfin, la contrainte (4.54) définit la nouvelle capacité disponible au cours de la semaine.

## 4.6 Décisions distribuées au niveau des sous-lots

L'idée principale à ce niveau est de prendre des décisions de façon distribuée au plus près du flux de production. Pour cela, on considère le produit comme l'entité décisionnelle de base qui déclenchera le processus de division des sous-lots. Cette entité est conçue en utilisant la structure de produit intelligent présentée dans la section 3.2. La figure 4.6 montre cette partie dans le schéma général. Pour développer cette sous-section, nous commençons par définir la séquence des sous-lots dans les deux paragraphes : *séquence*

*virtuelle* et *séquence physique* puis nous décrirons la façon dans laquelle les pannes seront traitées.

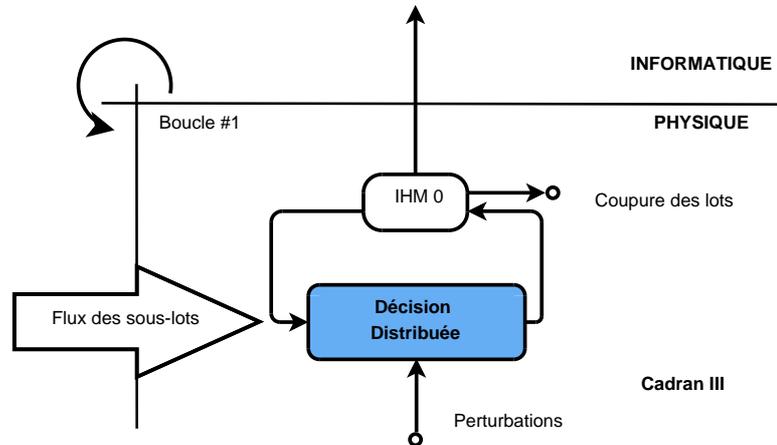


FIGURE 4.6 – Décision Distribuée

La *séquence virtuelle* correspond à tous les sous-lots qui ont été planifiés, mais qui ne sont pas encore instanciés physiquement (cadran II, voir figure 4.1). Nous verrons par la suite que cette séquence de sous-lots apporte de la flexibilité puisqu'elle est modifiée régulièrement.

La *séquence physique* correspond à tous les sous-lots dans la séquence qui sont déjà instanciés physiquement. Cette séquence de sous-lots, étant mise en œuvre, ne permet pas une grande flexibilité en termes de changements d'ordre et de taille. Dans les paragraphes suivants nous expliquerons en détail l'intérêt et la pertinence de réaliser cette différence entre les séquences.

Comme nous l'avons dit, les perturbations à ce niveau correspondront à des pannes de machines dans l'atelier. Nous prendrons en compte ces pannes de deux manières : *dégradation du temps de production* et la *durée*.

Traditionnellement, les pannes de machines peuvent être caractérisées par deux états : marche ou arrêt. Dans notre situation, les lots passent par des modules qui comportent plusieurs étapes de production. Par ailleurs, les produits possédant des gammes alternatives de production, une fois qu'une ou plusieurs machines (dans les modules) tombent en panne, les produits verront leur temps de production augmenter. Pour modéliser cette situation, nous considérons que les temps de production peuvent être dégradés dans un certain pourcentage de leur temps dans des « conditions normales d'opération ». Ainsi, une dégradation de 100% correspondra à un arrêt complet du module (ou sous-module). Du fait que nous considérons que le système revient toujours aux conditions normales d'opération après la réparation de la panne, les dégradations sont considérées avec une certaine durée. La figure 4.7 montre comment les pannes sont considérées.

Notons que les dégradations détériorent la valeur du  $C_{max}$  calculée initialement en fonction de la durée (voir figure 4.8).

Dès qu'une perturbation (panne de machines) arrive sur un module, la fonction distribuée embarquée dans les produits évalue la pertinence et la faisabilité d'une division du

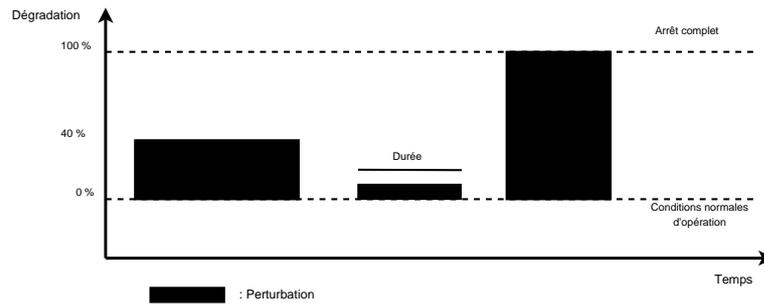


FIGURE 4.7 – Caractérisation des perturbations

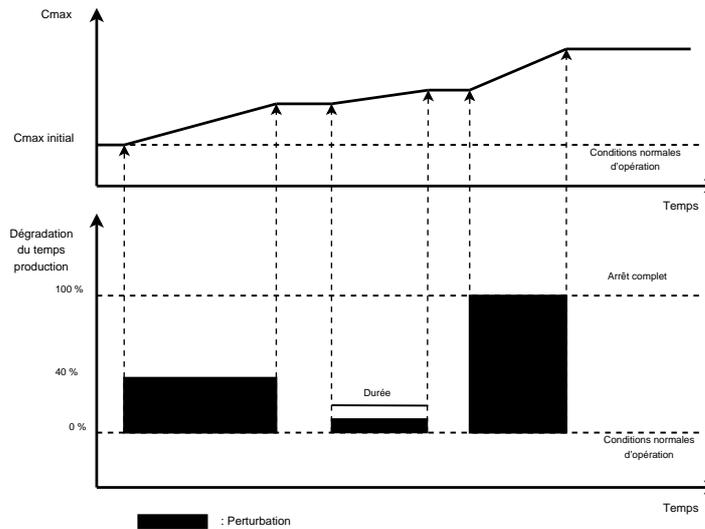


FIGURE 4.8 – Dégradation du  $C_{max}$

sous-lot qui est en train de passer sur le module. Ce processus est développé dans deux étapes :

- ⇒ Faisabilité de la division des lots.
- ⇒ Évaluation du nouveau  $C_{max}$  ( $C_{eval}$ ).

#### 4.6.1 Faisabilité de la division des lots

Si la perturbation est considérée comme significative, l'holon produit doit évaluer s'il est possible d'effectuer une division du sous-lot. Pour cela, il doit récupérer des informations concernant l'état du stock et aussi la présence d'autres sous-lots du même produit dans la séquence virtuelle pour réassigner au flux la quantité qui restera en stock après la division du sous-lot. Dans cette étape, l'holon produit vérifie qu'il existe des sous-lots candidats (est dit candidat, un sous-lot qui peut, à la place du sous-lot en cours de production concerné par la panne, être lancé en production à sa place) pour les affecter à la place du sous-lot divisé, dans le cas où la perturbation correspond à une réduction de la cadence du module et non pas à un arrêt complet (cas d'une gamme n'utilisant pas la machine en panne, par exemple). Dans ce dernier cas, il n'est pas nécessaire, à l'évidence,

de vérifier l'existence des lots candidats.

## 4.6.2 Évaluation des alternatives

Une fois que la faisabilité de la division est déterminée, l'holon produit crée un agent (agent solver) qui évaluera les différentes alternatives possibles. L'agent solver créé utilise un modèle de programmation linéaire qui cherchera à replacer la quantité du sous-lot divisé et à évaluer les différentes alternatives possibles qui minimisent l'augmentation du  $C_{max}$ . Ces alternatives correspondent aux différents sous-lots de la même référence qui verront leurs tailles augmenter et qui seront placés dans la file d'attente du sous-module qui les transformera. Nous verrons dans la description des contraintes du modèle ci-dessous que pour mettre en œuvre cela, nous avons choisi de ré-affecter la quantité du sous-lot divisé aux sous-lots de la même référence dans la séquence virtuelle. Ces produits étant déjà transformés par le module  $A$ , leurs temps de transformation sur ce module ne seront pas considérés. Par la suite, nous décrivons le modèle d'évaluation.

$$(M_{EVA}) \quad \min C_{max}^v \quad (4.56)$$

s.t.

$$\sum_{i \in n_l} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} = Q_l, \quad \forall l. \quad (4.57)$$

$$\sum_{i \in n_l} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{bijk} = Q_{cut}, \quad \forall l. \quad (4.58)$$

$$x_{ijk} \leq Q_l \cdot yp_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.59)$$

$$x_{ijk} \geq q_l \cdot yp_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.60)$$

$$x_{bijk} \leq Q_{cut} \cdot z_{ijk}, \quad i \in n_l, \forall l, \forall j, \forall k. \quad (4.61)$$

$$STA_1 = 0. \quad (4.62)$$

$$STA_j = STA_{j-1} + \sum_{i \in n_l} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K TPA_l \cdot x_{i(j-1)k} + SA_l \cdot yp_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1. \quad (4.63)$$

$$STB_{1k} = 0, \quad \forall k. \quad (4.64)$$

$$STB_{jk} \geq STA_j + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPA_l \cdot y_{ijk}, \quad \forall j, \forall k. \quad (4.65)$$

$$STB_{jk} \geq STB_{(j-1)k} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot (x_{i(j-1)k} + x_{bi(j-1)k}) + SB_l \cdot yp_{i(j-1)k}, \quad \forall j : j > 1, \forall k. \quad (4.66)$$

$$C_{max}^v \geq STB_{Jk} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in n_l} TPB_l \cdot (x_{iJk} + x_{biJk}) + SB_l \cdot yp_{iJk}, \quad \forall k. \quad (4.67)$$

$$x, xb, STA, STB, C_{max}^v \geq 0 \quad (4.68)$$

Sur la même base que le modèle  $M_{LS}$ , nous définissons une nouvelle variable  $xb_{ijk}$  qui représente la quantité à replacer dans les lots du même type de produits. Comme nous l'avons expliqué précédemment, ce modèle prend en compte la dernière séquence planifiée ( $yf_{ijk}$ ) (séquence virtuelle fixée) comme paramètre. Pour l'affectation aux sous-lots du même type, nous définissons un paramètre binaire additionnel  $z_{ijk}$  qui vaudra (1) pour les lots du même type de produits et (0) dans le cas contraire.

La contrainte (4.58) assure que la somme des quantités remplacées doit être égale à la quantité à diviser. La contrainte (4.59) force à zéro toutes les variables  $xb_{ijk}$  qui ne correspondront pas au type de produit affecté. Finalement, les contraintes (4.66) et (4.67) considèrent que le temps de production sur B, uniquement, doit être augmenté de façon proportionnelle aux quantités remplacées pour prendre en compte les pièces additionnelles. Ce modèle donnera la nouvelle valeur du  $C_{max}^v$ . Alors,  $C_{max}^v$  correspond au temps nécessaire pour finir la production de la *séquence virtuelle*.

Maintenant, il reste à déterminer l'effet de la division des lots, en termes de la variation du  $C_{max}$  dans la *séquence physique* ( $C_{max}^p$ ). Mais, avant de passer à l'explication de ce point, nous allons développer davantage quelques éléments de justification de la dichotomie entre *séquence virtuelle* et *séquence physique*.

Pour le modèle d'évaluation de la division des sous-lots ( $M_{EVA}$ ), une autre solution aurait pu être envisagée. En effet, nous aurions pu considérer une évaluation globale de leur nouvelle séquence, mais cela serait revenu à une approche du type centralisée qui n'est pas dans l'esprit de nos travaux. Notre objectif défini dans le chapitre 1 est de développer un système *hybride* (centralisé/distribué), qui tienne compte du fait que le produit est acteur, comme principe de base de notre recherche et pour que cette hybridation permette de profiter des avantages de ces deux visions pour la prise de décision.

En interprétant le produit comme entité de base du cadre de modélisation développé, l'intérêt de la dichotomie entre *virtuel* et *physique* est justement que le produit soit l'entité à charge de la synthèse de cette deux réalités. L'idée est alors de donner au produit une *vision du monde* ou représentation de son environnement, par l'intermédiaire du modèle  $M_{EVA}$ , qui lui permettra d'évaluer les effets de ses actions dans le monde physique. Mais, bien que cela permette à l'holon produit d'évaluer ses actions dans leur effet global par des scénarios des séquences virtuelles, il faut remarquer que les actions du monde physique ont une nature complètement différente des changements qui peuvent être opérés dans une séquence virtuelle de sous-lots (planification).

En outre, il a été montré que ne pas faire cette différenciation entre *virtuel* et *physique* ou entre *informatique* et *physique* peut conduire à de fausses suppositions ou à une simplification excessive dans des problématiques industrielles réelles (Valckenaers et al. 2007, Falkenauer 2005).

Dans les systèmes holoniques de production et en particulier les systèmes contrôlés par le produit, la problématique de la dichotomie entre le *monde informatique* et le *monde physique*, a été largement traitée, en surlignant leurs différences en termes d'objectifs, d'outils, d'hypothèses, ou de compatibilités, etc. (Pro 2001, Trentesaux 2007). Cela est même un des éléments de base qui a donné lieu au concept d'holon (Koestler 1968). Dans notre cas, considérer une *séquence virtuelle* et une *séquence physique*, sera le point central de la mise en œuvre de la connexion entre la partie centralisée et la partie distribuée.

Pour déterminer la nouvelle valeur du  $C_{max}$  de la *séquence physique* ( $C_{max}^p$ ) nous considérons deux possibilités :

1. Placer les différents sous-lots candidats dans la *séquence physique* à la place du sous-lot divisé et évaluer le nouveau  $C_{max}^p$ . Cela est fait dans le cas où il existe des sous-lots candidats.
2. Évaluer seulement l'effet de la division en termes de  $C_{max}^p$ . Cela est fait dans le cas où il n'existe pas de sous-lots candidats ou dans le cas où il y a un blocage du module.

Il faut noter qu'un sous-lot qui est en train de passer sur l'étape de production  $A$  est aussi candidat à passer à la place du sous-lot divisé.

L'équation 4.69 montre que le résultat de l'évaluation sera la somme du temps de fin de la séquence physique plus le temps de fin de la séquence virtuelle. Cette valeur est nommée  $C_{eval}$ .

$$C_{eval} = C_{max}^v \oplus C_{max}^p \quad (4.69)$$

Il faut noter que nous utilisons le symbole  $\oplus$  pour souligner le fait que cette somme permet de prendre en compte l'intégration des différentes files d'attente de la séquence physique dans la fonction d'évaluation  $M_{EVA}$ .

Avec l'utilisation de la fonction  $C_{eval}$ , il est possible de déterminer les alternatives de solutions qui améliorent significativement la valeur du  $C_{max}$ , et qui peuvent induire une division des sous-lots. Il faut noter qu'il faudra aussi considérer d'autres facteurs de décision comme par exemple le nombre de changements dans les deux séquences (virtuelle et physique), ou encore les préférences de l'opérateur. Pour cela, les solutions obtenues et les changements induits seront affichés comme des alternatives pour informer les opérateurs. Ce processus décisionnel se développe dans une deuxième Interface Homme-Machine ( $IHM_0$ ) montrée dans la figure 4.9.

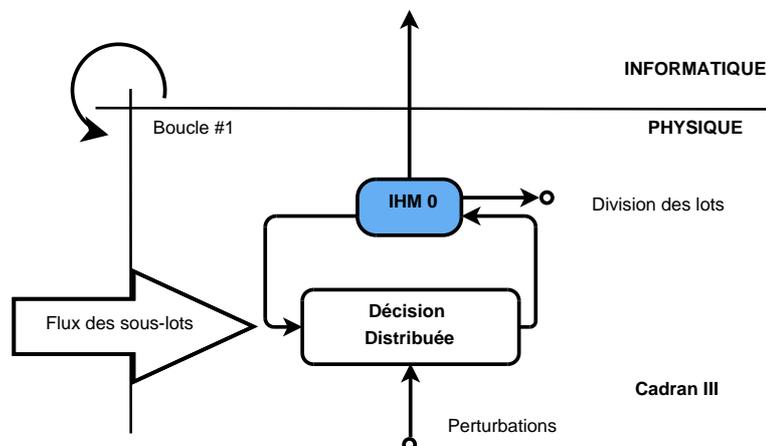


FIGURE 4.9 – Interface Homme-Machine décision distribuée

Notons enfin qu'une fois que les décisions distribuées ont été mises en œuvre, il est possible de relancer la fonction de lot-streaming centralisée pendant que le système physique refonctionne (hors-ligne), afin de recalculer une séquence de référence (A.2).

## **4.7 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de formuler tous les modèles permettant d'instancier le cadre générique à un système de production manufacturier. Ces modèles sont à utiliser séquentiellement (en-ligne) ou en parallèle (hors-ligne) pour la mise en œuvre des différentes décisions centralisées et/ou distribuées de notre proposition. Le chapitre suivant permettra de les appliquer dans un cas d'étude industriel à des fins d'évaluation et de validation.

# Chapitre 5

## Résultats expérimentaux

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Cas d'étude</b>	<b>83</b>
<b>5.2</b>	<b>Phase expérimentale de la partie centralisée</b>	<b>85</b>
5.2.1	Description de l'expérimentation	85
5.2.2	Étude du paramètre $\phi$	87
5.2.3	Résultats expérimentaux du modèle $M_I$	88
<b>5.3</b>	<b>Phase expérimentale système hybride</b>	<b>92</b>
5.3.1	Description de l'expérimentation	92
5.3.2	Résultats expérimentaux	92
5.3.3	Indicateurs globaux	93
5.3.4	Indicateurs de flux	95
<b>5.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>98</b>

---

### 5.1 Cas d'étude

L'entreprise étudiée est un sous-traitant de l'industrie automobile, filiale d'un groupe mondial qui fabrique des turbocompresseurs. Le site d'assemblage complet peut produire jusqu'à 10.000 produits par jour, avec des centaines de références. L'usine est divisée en cellules de production, chacune comporte toutes les étapes de production nécessaires pour fabriquer un produit fini. Certaines cellules de production sont dédiées à un client spécifique. Dans notre étude, nous considérons l'une de ces cellules de production.

Dans la cellule étudiée, le processus de production est divisé en deux étapes. Une première série d'opérations est réalisée dans la première ligne (module  $A$ ) générant des produits semi-finis. Ensuite ces produits sont assemblés sur trois sous-modules de montage indépendants (formant le module  $B$ ). En outre, la cellule de production comprend le stockage des matières premières, produits semi-finis et finis.

Un ERP est utilisé de manière centralisée pour établir le PDP, mais certaines décisions de gestion des opérations sont décentralisées le plus près possible de l'écoulement des produits. Selon la politique de gestion, les opérateurs d'un module sont effectivement

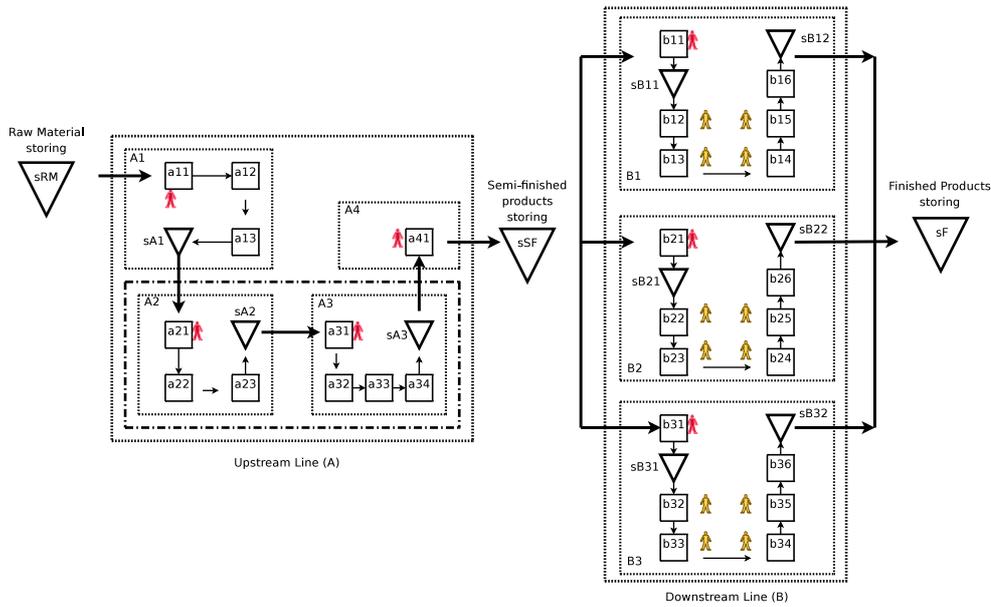


FIGURE 5.1 – Cellule de production

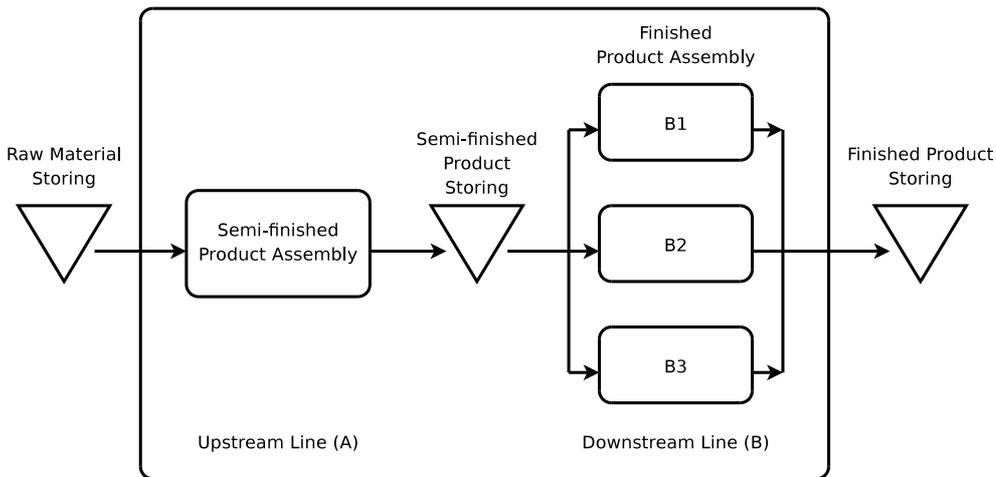


FIGURE 5.2 – Vision agrégée de la cellule de production

habilités à ajuster le planning hebdomadaire. Ainsi, les demandes de modifications des clients ou les contraintes sur les commandes sont directement résolues par les opérateurs.

Le système centralisé de contrôle planifie les tâches selon la règle du « ratio critique », défini comme le rapport entre le temps de traitement et le temps disponible avant la date d'échéance. Un plan prédictif est alors mis en œuvre par les centres de décision, où les tâches sont retardées en cas de perturbations. Ces tâches ne sont reportées que lorsque les perturbations majeures se produisent.

Comme le module *B* peut consommer trois sortes de produits en même temps, le problème de décision majeur est de choisir si et quand il faut changer la configuration sur

la ligne  $A$ . Cette décision vise à minimiser le nombre de configurations, tout en minimisant le niveau de l'en-cours ( $WIP$ ) et en évitant les pénuries sur les lignes en aval (sous-modules  $B$ ). En outre, les dates d'exigibilité doivent être respectées.

Par conséquent, la gestion des ordres de production est un enjeu essentiel pour piloter le module. Effectivement, alors que la chaîne de production en amont produit un seul type de produit à la fois, les lignes en aval peuvent consommer trois types différents. En conséquence si les niveaux de stocks entre les deux lignes de production sont faibles cela risque d'avoir un impact sur l'augmentation des délais. La division de lots est ainsi la seule façon d'éviter la famine dans l'alimentation des lignes en aval. Néanmoins, cette division de lots est elle-même coûteuse en termes de temps, en raison des réglages qui prennent environ une demi-heure. Ainsi, trop de changements de références réduisent la productivité du module, tandis que trop peu de changements conduisent à des ruptures de stock.

Les parties suivantes décrivent les résultats expérimentaux, d'abord pour la partie centralisée, puis pour la partie contrôlée par le produit (partie distribuée). Compte tenu de la somme des modèles exploités les résultats auraient pu être développés de diverses manières. Nombreux auraient pu être les indicateurs mis en évidence. Nous avons choisi de rester sobrement sur l'axe directeur de ces travaux, à savoir montrer la capacité de réaction du système tout en montrant sa capacité à sauvegarder les qualités de non-nervosité et de stabilité nécessaires au maintien des coûts estimés lors de l'établissement des plans tactiques. Pour ce faire, nous verrons plus loin que nous avons utilisés deux types d'indicateurs : des indicateurs globaux pour les objectifs précédemment cités et des indicateurs de flux pour mesurer l'efficacité du sous-système distribué.

## 5.2 Phase expérimentale de la partie centralisée

Cette partie décrit la mise en œuvre des expériences de validation de la partie centralisée.

### 5.2.1 Description de l'expérimentation

Dans l'objectif d'avoir un nombre significatif d'instances, nous proposons de générer des instances de ce problème de manière aléatoire telle que les valeurs des paramètres soient proches des valeurs industrielles réelles. Le nombre de produits a été réduit pour rester dans un temps de simulation acceptable. Dans notre cas, l'intervalle de temps ainsi que la périodicité valent une semaine et l'horizon opérationnel est de 52 semaines (une année) alors que l'horizon de planification est de 8 semaines (deux mois). Celui-ci a été choisi de manière à avoir suffisamment de visibilité pour mesurer l'instabilité. Rappelons que dans la réalité industrielle, il est au moins égal au délai cumulé le plus long. Les paramètres  $p_{it}, h_{it}, b_{it}, q_{it}$  sont générés aléatoirement selon une loi uniforme.

La demande, elle, a été générée en utilisant une distribution normale.

$$d_{it}^k \sim \eta(\mu, \sigma), \quad \forall i, \forall t, \forall k. \quad (5.1)$$

Pour simuler différents niveaux de variation, la valeur de  $\mu$  a été fixée et l'écart-type a été calculé par  $\sigma = \epsilon\mu$  avec ( $\epsilon=5,10,15,20$  (in %)).

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Produits ( $m$ )	12
Horizon de planification ( $n$ )	8
Horizon opérationnel ( $H$ )	52
Demande ( $d$ )	$\eta(1200, \sigma)$
Production ( $p$ )	U([5,15])
Stocks ( $h$ )	U([10,25])
Retards ( $b$ )	U([20,40])
Temps de réglage ( $q$ )	U([1900,2200])
Variation de la demande ( $\epsilon$ )	5,10,15,20 (in %)

Différentes séries d'expérimentations ont été mises en œuvre et peuvent être décrites comme trois processus chaînés. La première série porte sur la première semaine et fait varier le paramètre  $\phi$  de telle manière que le modèle  $M_I$  est calculé pour différentes valeurs de celui-ci. Un ensemble de solutions a ainsi été obtenu correspondant à diverses valeurs expérimentales de  $\phi$ . Cet ensemble de solutions correspond à des plans de production valides qui sont mis à la disposition du décideur et qui assurent un compromis entre stabilité et coût de production.

La seconde série d'expériences consiste en la mise en œuvre de la série précédente pour tous les cycles sur 52 semaines. Plus précisément, pour chaque cycle, une instance différente est générée en faisant varier la demande et les coûts. Ces variations permettent de simuler des situations à l'image de la réalité. Finalement, les deux expérimentations décrites sont mises en œuvre avec une variation ( $\epsilon$ ) par rapport à la demande initiale. La figure 5.3 montre la procédure expérimentale. A chaque cycle, tous les modèles ( $M_P, M_I, M_{NG}$  ou  $M_{NL}$ ) sont lancés indépendamment de telle manière que les résultats du cycle précédent sont pris comme conditions initiales pour le cycle suivant (stocks et retards). La variation la plus importante provient de la demande alors que les coûts restent constants sur le reste de l'horizon de planification. Notons que le nombre de simulations est de 60 alors que seulement 52 semaines sont prises en compte. Ceci permet de comparer toutes les périodes avec les mêmes informations.

Les expérimentations ont été faites pour  $\epsilon \text{ valant } \{0,05; 0,1; 0,15; 0,2\}$  en supposant que la demande varie selon une loi normale. Les valeurs numériques sont présentées dans le tableau 5.1. Notons aussi que les intervalles des paramètres ont été choisis de manière à avoir un chevauchement possible des valeurs. Les instances ont été générées en Python 2.6<sup>1</sup>, et le modèle MIP est résolu en utilisant Cplex <sup>®</sup>.

---

1. <http://www.python.org>

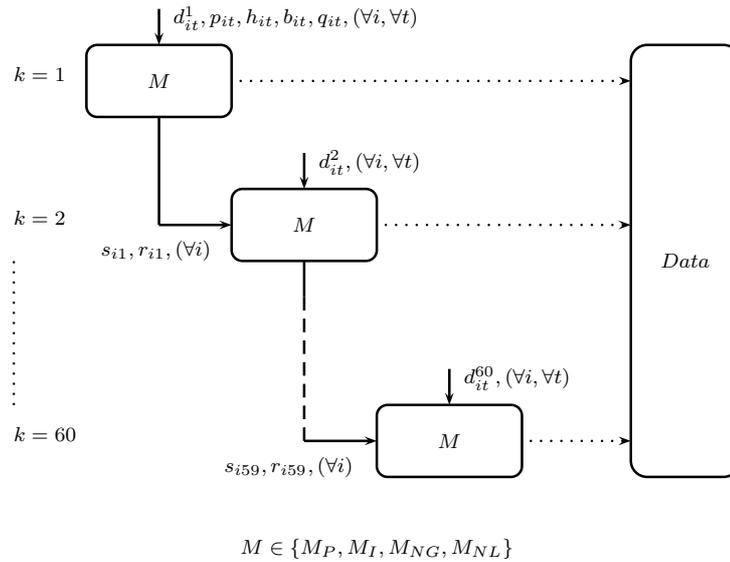
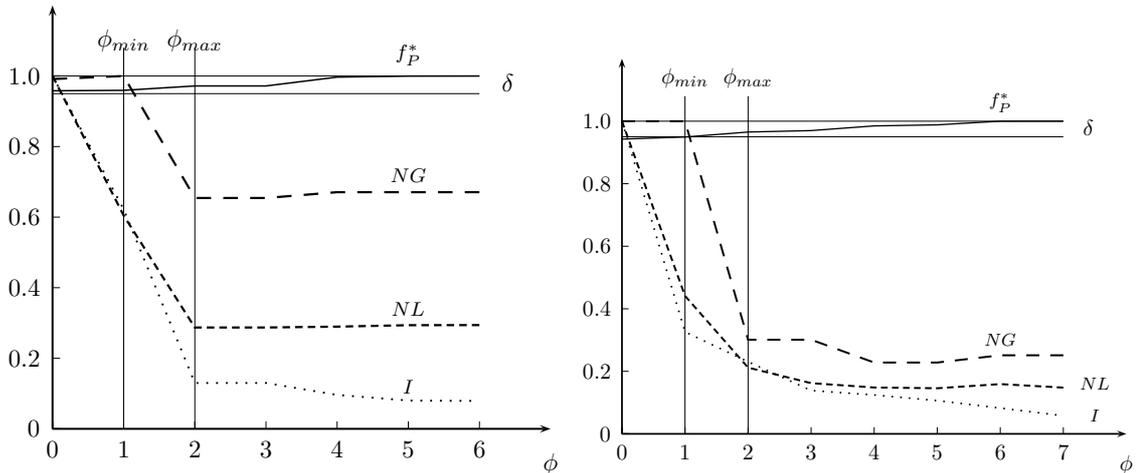


FIGURE 5.3 – Schéma de simulation.

### 5.2.2 Étude du paramètre $\phi$

L'expérimentation menée dans cette section correspond à la première série de calculs concernant l'aspect paramétrique. Une première phase est nécessaire pour déterminer des valeurs qui permettent une réduction significative de l'instabilité sachant que ces valeurs sont différentes selon les instances de problèmes (données). Ensuite, une seconde phase est nécessaire pour trouver le meilleur compromis entre coût direct et instabilité.


 FIGURE 5.4 – Deux cas de compromis dans le processus de prise de décision entre les mesures du coût total ( $f_P^*$ ), de l'instabilité ( $I$ ) et de la nervosité ( $NG$  and  $NL$ ).

Les figures 5.4-(a) et 5.4-(b) montrent les résultats obtenus pour deux instances représentatives. Ces figures montrent la variation du coût de production ( $f_P$ ), la réduction de l'instabilité ( $I$ ) et la réduction conséquente de la nervosité ( $NG$  and  $NL$ ) en fonction du

paramètre  $\phi$ . Les deux graphiques permettent de mettre en évidence l'apport du modèle  $M_I$  par rapport au modèle conventionnel  $M_P$  pris en référence. Les ordonnées correspondent au rapport  $f_I$  sur  $f_P$ . Par conséquent, pour  $\phi = 0$  la valeur 1.0 correspond au cas où  $f_I = f_P$ . Par exemple, dans la figure 5.4-(a) quand  $\phi = 5$  l'augmentation du coût montrée par  $f_I^*$  signifie que  $f_I^*/f_P^*$  a excédé légèrement 100% tel que  $f_I^* = f_P^*$  quand  $\phi = 0$ . Cela montre que le coût additionnel n'est pas très important par rapport à la réduction de l'instabilité  $I$ , qui est réduite de 80% par rapport à sa valeur initiale.

De cette manière, un ensemble de solutions est obtenu tel que chaque solution corresponde à une valeur particulière de  $\phi$ . Ainsi, toutes ces solutions présentent un compromis entre la réduction de l'instabilité et l'augmentation du coût. Toutefois, la réduction de l'instabilité n'est plus intéressante lors d'une détérioration importante du coût  $f_P^*$ . Une borne supérieure  $\phi_{max}$  correspond à une limite acceptable de détérioration du coût. De la même manière, une borne inférieure  $\phi_{min}$  définit un seuil minimal de réduction significative de l'instabilité. Il faut noter qu'un autre compromis doit être trouvé concernant la longueur de l'intervalle et le nombre de solutions obtenues dans un laps de temps raisonnable.

### 5.2.3 Résultats expérimentaux du modèle $M_I$

Cette section est dédiée à la comparaison de la performance des modèles au regard de la réduction de l'instabilité ( $I$ ), de la nervosité ( $NG, NL$ ) et de l'augmentation du coût total. Notons que ces modèles sont décrits dans l'annexe B. Parce que la nervosité est relative à plusieurs cycles de replanification, la phase d'expérimentation est alors mise en œuvre sur plusieurs cycles sur l'horizon opérationnel. Dans ce qui suit, l'analyse est faite au regard d'une variation de 5% de la demande. Par la suite, des résultats globaux sont présentés dans les tables 5.2, 5.3 et 5.4.

Dans les figures 5.5 et 5.6, nous observons l'évolution du profit obtenu avec le modèle  $M_I$  comparé au modèle  $M_P$  en fonction de l'instabilité et de la nervosité pour toutes les périodes de l'horizon opérationnel.

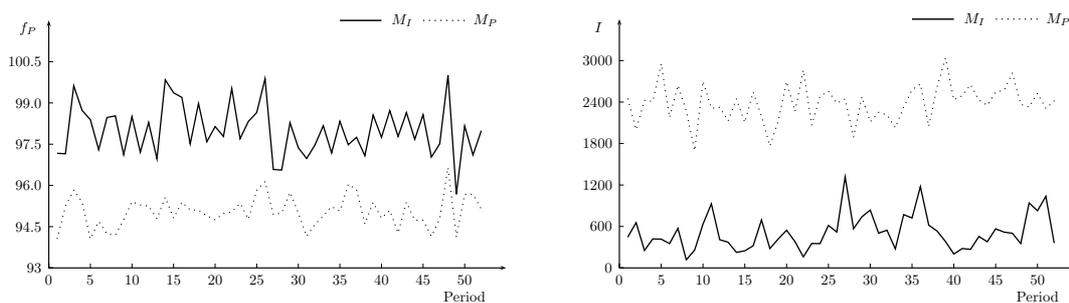


FIGURE 5.5 – Différences entre  $M_P$  et  $M_I$  concernant le coût total (a) et l'instabilité (b).

La figure 5.5 permet de voir que le modèle  $M_I$  induit une réduction considérable de l'instabilité et de la nervosité sans pour autant augmenter le coût. Notons de plus que la réduction de la nervosité suit la même tendance que celle de l'instabilité, i.e. la nervosité est au plus bas en même temps que l'instabilité. Les résultats numériques sont reportés dans les figures 5.7 et 5.8 afin de permettre une analyse des résultats obtenus avec les modèles  $M_{NG}$  et  $M_{NL}$ .

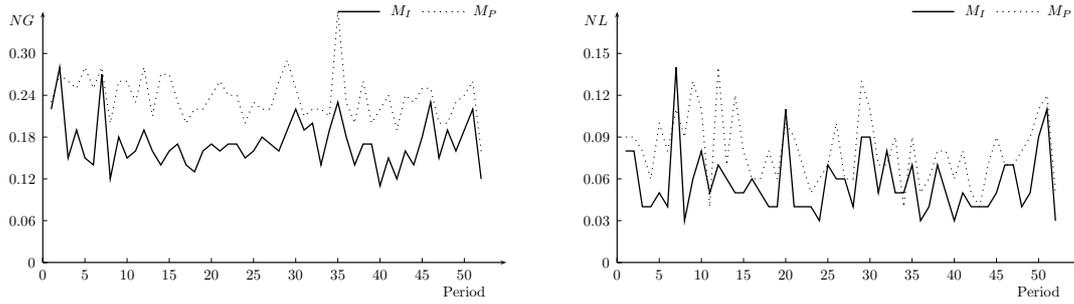


FIGURE 5.6 – Différences entre  $M_P$  et  $M_I$  concernant la nervosité.

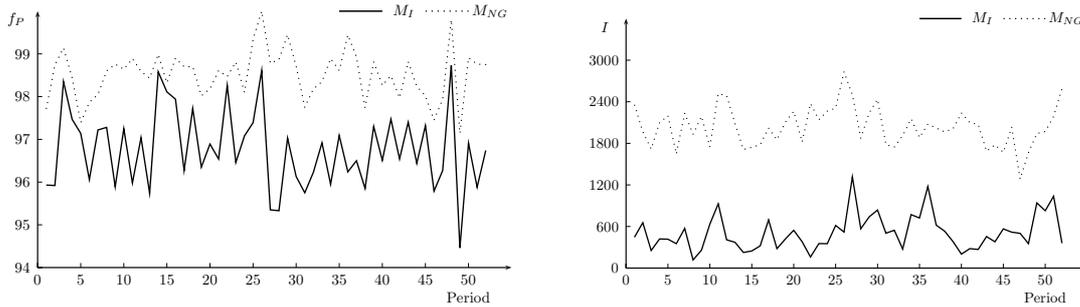


FIGURE 5.7 – Différences entre  $M_I$  et  $M_{NG}$  concernant le coût total (a) et l'instabilité (b).

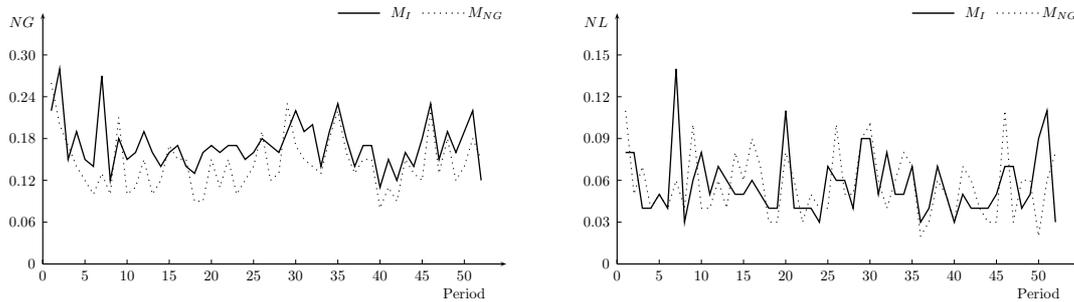


FIGURE 5.8 – Différences entre  $M_I$  et  $M_{NG}$  concernant la nervosité.

Pour les instances des figures 5.7 et 5.8, nous pouvons observer des résultats proches de ceux des modèles  $M_I$  et  $M_{NG}$ . Mais l'observation la plus intéressante réside dans le compromis entre instabilité et nervosité montré dans le modèle  $M_I$  sans augmentation du coût.

Au final, les figures 5.9 et 5.10 montrent que le modèle  $M_I$  se comporte mieux que le modèle  $M_{NL}$  même pour la mesure de  $NL$ . Cette tendance observée pour une seule instances, sera confirmée pour l'ensemble des instances dans les tableaux de résultats ci-dessous. Ces résultats s'expliquent par la nature dynamique de la procédure d'horizon glissant dans laquelle les possibilités d'optimisation dépendent fortement des décisions déjà prises.

Dans la table 5.2, le coût de production obtenu avec le modèle conventionnel  $M_P$  est comparé aux coûts obtenus avec les modèles  $M_I$ ,  $M_{NG}$  et  $M_{NL}$ . Pour la clarté, la colonne  $M_P$  contient le coût de production  $f_P$  alors que les autres montrent les écarts relatifs aux résultats obtenus avec  $M_P$ . Par exemple, quand la variation de la demande est de

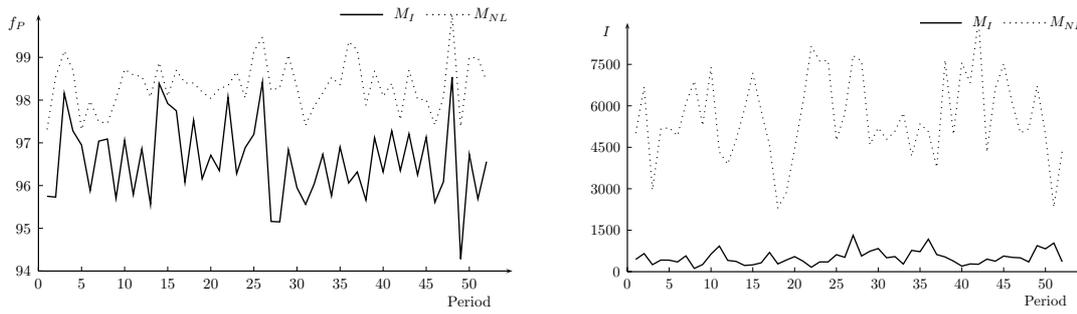


FIGURE 5.9 – Différences entre  $M_I$  et  $M_{NL}$  concernant le coût total (a) et l’instabilité (b).

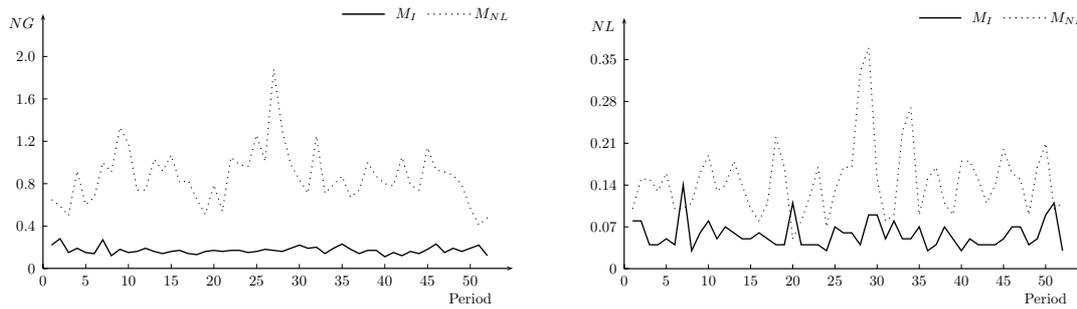


FIGURE 5.10 – Différences entre  $M_I$  et  $M_{NL}$  concernant la nervosité.

TABLE 5.2 – Différences relatives des modèles  $M_I, M_{NG}$  et  $M_{NL}$  au regard de  $M_P$  concernant le coût ( $f_P$ )

Demande	Stat.	$M_P$	$M_I$	$M_{NG}$	$M_{NL}$
5%	min	366219,00	1,73	4,62	5,00
	max	376343,00	3,47	4,80	5,00
	mean	370112,98	3,11	4,99	5,00
10%	min	362568,00	1,05	4,71	5,00
	max	384030,01	3,84	6,93	5,00
	mean	371769,92	2,53	5,14	4,92
15%	min	358891,00	2,71	4,73	5,00
	max	404775,99	4,53	7,44	5,00
	mean	378310,07	1,83	5,21	4,20
20%	min	356429,00	1,08	4,95	5,00
	max	419103,00	4,87	9,92	4,95
	mean	384842,74	2,02	4,96	3,90

5%, l’instance avec le coût de production minimal obtenu avec  $M_P$  est 366219. De plus, l’instance qui présente l’écart minimum de 366219 est 1,7% avec  $M_I$ . La pire déviation est de 3,47% de 376343 et la valeur moyenne est de 3,11% pour 370112.

A l’évidence, une augmentation du coût de production est montrée avec le modèle  $M_P$  étant donné que  $f_I$  minimise le coût global en considérant le lissage de la production. L’augmentation du coût peut être interprétée comme le prix à payer pour obtenir ce niveau de stabilité. Néanmoins, le modèle  $M_I$  est le plus intéressant au regard de la dégradation obtenue avec le modèle  $M_{NG}$ . En fait, le pire des cas correspond à la ligne *max* pour

laquelle un coût additionnel de moins de 5% est à payer, la moyenne étant d'environ 3%. Le modèle  $M_{NL}$  induit des coûts comparables à ceux du modèle  $M_{NG}$  compte tenu du fait qu'il y a moins de 1% d'écart entre eux.

La table 5.3 montre l'amélioration significative obtenue par le modèle  $M_I$  au regard de la réduction de l'instabilité. En fait, ce modèle conduit à une réduction de plus de 93% de la mesure  $I$  pour des variations de la demande de 5%. Évidemment, le niveau de réduction obtenu dépend de la variation de la demande : plus grande est cette dernière, plus le système sera instable (voir la ligne moyenne dans la table 5.3 qui décroît de 78,5% à 35,8%). Ceci peut être expliqué par la possibilité de lisser la production lorsque la demande cumulée n'excède pas la capacité disponible. Concernant le modèle  $M_{NG}$ , la réduction de l'instabilité est moins marquée (elle n'excède pas 30%). Néanmoins, quand la variation de la demande augmente, la différence entre les modèles  $M_I$  et  $M_{NG}$  diminue de (78,5-14,3=64,2) à (35,8-29,4=6,4). Enfin le modèle  $M_{NL}$  présente le plus mauvais résultat concernant l'instabilité étant donné qu'il détériore même la performance du modèle conventionnel CLSP.

TABLE 5.3 – Différences relatives des modèles  $M_I, M_{NG}$  et  $M_{NL}$  au regard du modèle  $M_P$  concernant l'instabilité ( $I$ )

Demande	Stat.	$M_P$	$M_I$	$M_{NG}$	$M_{NL}$
5%	min	1697,00	-93,08	-24,21	36,12
	max	3037,00	-56,66	-6,77	200,20
	mean	2382,78	-78,52	-14,28	134,22
10%	min	3197,33	-82,79	-20,25	48,32
	max	6127,20	-14,71	-25,30	82,65
	mean	4788,84	-50,86	-24,56	51,46
15%	min	5514,88	-67,98	-29,87	3,98
	max	14776,32	-48,30	-26,85	-0,76
	mean	7703,96	-40,79	-28,09	20,20
20%	min	7278,64	-61,96	-25,79	-6,85
	max	23808,07	-34,21	-32,08	-0,75
	mean	10928,35	-35,82	-29,43	7,37

La table 5.4 permet de comparer la nervosité obtenue avec les modèles  $M_{NG}$  et  $M_{NL}$ . Les résultats numériques montrent la supériorité du modèle  $M_{NG}$  étant donné qu'il présente les valeurs minimales de la mesure globale de la nervosité  $NG$ . Notons cependant, que la performance du modèle  $M_I$  n'est pas si importante. Par ailleurs et en considérant une mesure locale de nervosité, il n'y a pas de modèle dominant étant donné que  $M_{NL}$  dépasse  $M_I$  et  $M_{NG}$  en moyenne pour les instance avec 15 et 20% de variation de la demande. De plus des résultats très similaires sont obtenus pour des variations plus faibles qui correspondent plus à une réalité industrielle.

Pour conclure, le modèle  $M_I$  présente le meilleur compromis au regard de tous les indicateurs de performance  $f_P, I, NG$  et  $NL$ , le tout pour un coût de production additionnel minimale au vu des gains en nervosité et instabilité. Cependant, si la nervosité est plus souhaitée, le modèle  $M_{NG}$  devient alors préférable, mais entraînera une plus grande

détérioration du coût.

TABLE 5.4 – Différences relatives entre les modèles  $M_I, M_{NG}$  et  $M_{NL}$  au regard du modèle  $M_P$  concernant la nervosité ( $NG$  et  $NL$ ).

Demand	Stat.	NG			NL		
		$M_P$	$M_I$	$M_{NG}$	$M_P$	$M_I$	$M_{NL}$
5%	min	0,16	-32,21	-50,39	0,04	-37,69	8,19
	max	0,36	-23,32	-28,18	0,14	2,85	168,10
	mean	0,24	-28,03	-39,63	0,08	-28,35	84,08
10%	min	0,37	-25,62	-43,51	0,09	-23,40	-31,96
	max	0,76	-24,70	-36,06	0,27	-5,55	6,40
	mean	0,48	-16,84	-30,66	0,16	-11,89	-4,07
15%	min	0,57	-14,41	-35,35	0,12	-23,74	-24,00
	max	1,77	-47,47	-55,71	0,98	-55,24	-64,54
	mean	0,80	-21,87	-32,45	0,27	-22,97	-37,71
20%	min	0,75	-16,11	-32,48	0,18	-33,49	-29,40
	max	2,46	-19,60	-34,97	1,29	-15,88	-73,44
	mean	1,17	-20,41	-37,18	0,40	-14,12	-45,55

## 5.3 Phase expérimentale système hybride

### 5.3.1 Description de l'expérimentation

Nous avons du développer une application spécifique pour mettre en œuvre l'expérimentation du système hybride afin de simuler les conditions de l'atelier et les décisions du système de contrôle. Pour cela nous avons utilisé comme base *Emulica*. Cette application développée à l'issue des travaux de Pannequin (2007) permet l'émulation d'un système de contrôle, à savoir, la simulation des flux des produits et l'activation indépendante des règles qui régissent ces flux. L'annexe A.1 montre le diagramme de classes de l'application développée. L'annexe A.2 montre un diagramme d'activités représentant le processus de prise de décision distribuée implémenté dans l'agent produit.

### 5.3.2 Résultats expérimentaux

Pour évaluer la pertinence du système hybride proposé, nous avons mis en œuvre différentes expériences montrant l'apport des décisions distribuées dans ce système par rapport à des décisions qui ne seraient que centralisées (ensemble des expériences précédentes). Nous évaluerons cette pertinence au regard des indicateurs suivants :

- ⇒ Indicateurs globaux : coût de production, instabilité et nervosité
- ⇒ Indicateurs de flux :  $C_{max}$ , nombre de décisions distribuées, en-cours

Ainsi la comparaison devra montrer l'apport du système hybride proposé par rapport au système centralisé. Nous avons vu dans la partie précédente que notre nouvelle formulation du PDP a permis d'améliorer considérablement la stabilité ce qui a engendré une

nette réduction de la nervosité. Dans cette partie, nous mettons en évidence un apport complémentaire de VSM-SCP par rapport à ce PDP déjà stable. Ceci est rendu possible grâce aux décisions distribuées prises par les *holons produits*. Nous commenterons successivement ces différents apports, d'abord au regard des indicateurs globaux, puis vis-à-vis des indicateurs de flux.

### 5.3.3 Indicateurs globaux

Nous avons déjà utilisé ces indicateurs, il s'agit là encore du coût donné par la fonction  $f_P$ , de la mesure  $I$  et  $NG$  et  $NL$

#### Nervosité $NG$

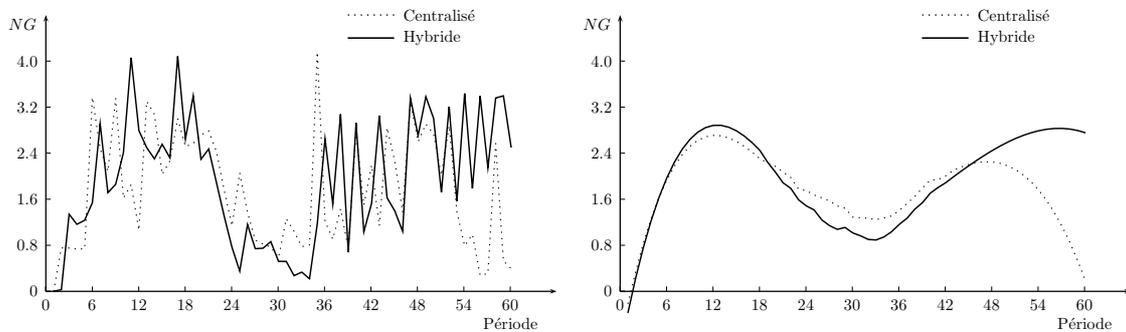


FIGURE 5.11 – Nervosité  $NG$

TABLE 5.5 – Table ANOVA pour le  $NG$

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	1,007	1	1,0069	18,79	0,3382
Error	128,511	118	1,08907		
Total	129,518	119			

#### Nervosité $NL$

TABLE 5.6 – Table ANOVA pour le  $NL$

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	0,1348	1	0,13481	0,93	0,3375
Error	17,2848	118	0,14534		
Total	129,518	119			

Les figures 5.11 et 5.12 montrent les deux mesures de l'indicateur de nervosité. Dans ces graphiques nous présentons les valeurs sans aucun traitement à gauche et les données

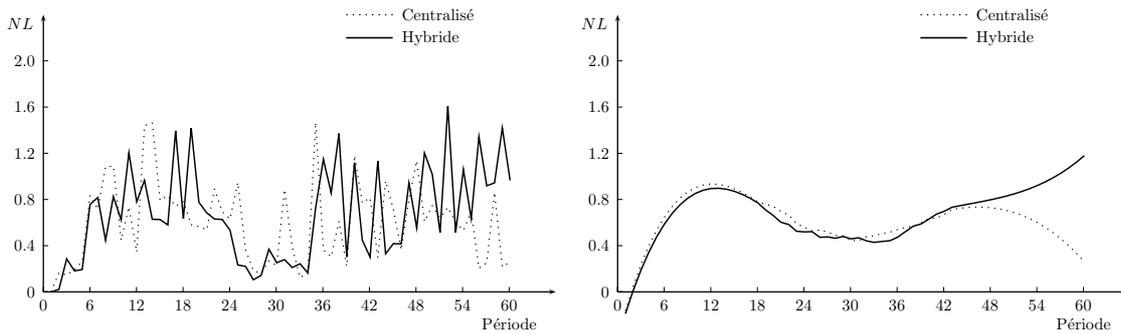


FIGURE 5.12 – Nervosité  $NL$

filtrées avec la méthode de (Golay & Savitzky 1964) à droite. La courbe verte représente les résultats de nervosité obtenus par le « mode centralisé » décrit précédemment, la courbe bleu, le mode « décisions distribuées ». A l'évidence, les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus précédemment. Ceci est tout à fait normal compte tenu du fait que cette mesure se réalise sur des modèles ne faisant aucunement intervenir les décisions des produits. Les tables 5.5 et 5.6 montrent l'analyse ANOVA pour déterminer s'il existe des différences significatives en termes de moyennes (Hypothèse  $H_0 : \mu_0 = \mu_1$ ). Les résultats des tests montrent que l'on ne peut pas refuser l'hypothèse nulle ( $H_0$ ), donc, il n'existe pas de différence significative entre le mode « décisions distribuées » et « centralisées » pour ce cas de figure.

### Coût production

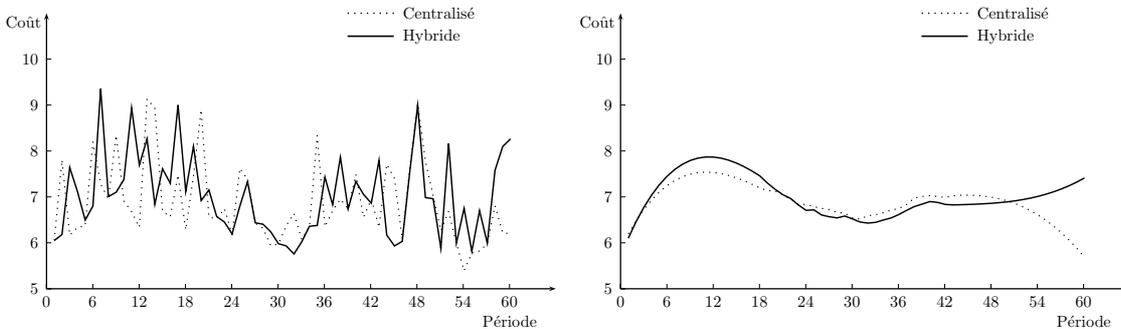


FIGURE 5.13 – Coût de production  $C$

TABLE 5.7 – Table ANOVA pour le coût production

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	6,0214e7	1	6,0214e7	0,78	0,3379
Error	9,09907e9	118	7,68566e7		
Total	9,12929e9	119			

## Instabilité

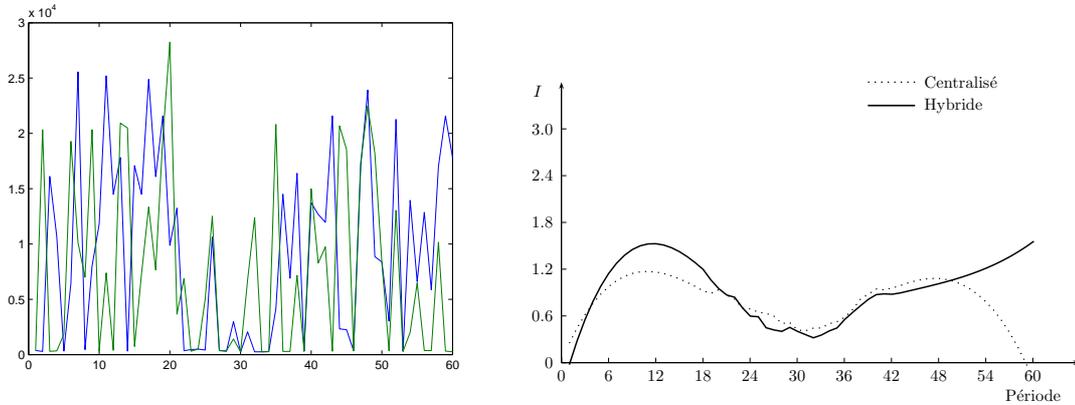
FIGURE 5.14 – Instabilité  $I$ 

TABLE 5.8 – Table ANOVA pour l'instabilité

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	8,45058e7	1	8,45058e7	1,28	0,2604
Error	7,79786e9	118	6,60835e7		
Total	7,88236e9	119			

Les figures 5.13 et 5.14 montrent respectivement les indicateurs coût de production et instabilité. Les tables 5.7 et 5.8 montrent l'analyse ANOVA pour déterminer s'il existe des différences significatives en termes de moyennes (Hypothèse  $H_0 : \mu_0 = \mu_1$ ). Les résultats des tests montrent que l'on ne peut pas refuser l'hypothèse nulle ( $H_0$ ), donc, il n'existe pas de différences significatives entre les moyennes pour le mode avec et sans décisions distribuées.

### 5.3.4 Indicateurs de flux

#### Indicateur $C_{max}$

Dans ces expériences, nous avons calculé le  $C_{max}$  (délai entre le début de la première pièce et la fin de la dernière pièce) dans les deux cas, à savoir, le cas où le produit est actif et l'autre où il ne l'est pas (on se retrouve donc dans la situation d'un système centralisé). Les figures 5.15 présentent respectivement l'évolution brute du  $C_{max}$  et son évolution en utilisant le même filtre que précédemment. Il est impératif, compte tenu des distributions statistiques utilisées dans les expériences d'en faire une analyse non pas période par période mais de comparer l'effet du système distribué par rapport au système centralisé au fil du temps.

Les résultats relatifs au  $C_{max}$  sont particulièrement intéressants. Ils mettent en évidence un gain net : une réduction important de celui-ci ainsi que de sa variabilité (figure

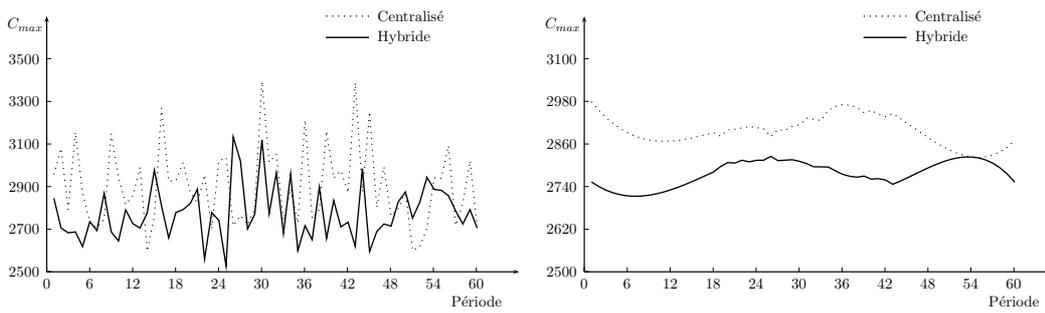


FIGURE 5.15 –  $C_{max}$

TABLE 5.9 – Tableau ANOVA pour le  $C_{max}$

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	471729.2	1	471729.2	18.79	3.09027e-5
Error	29622734.4	118	25107.9		
Total	3434463.6	119			

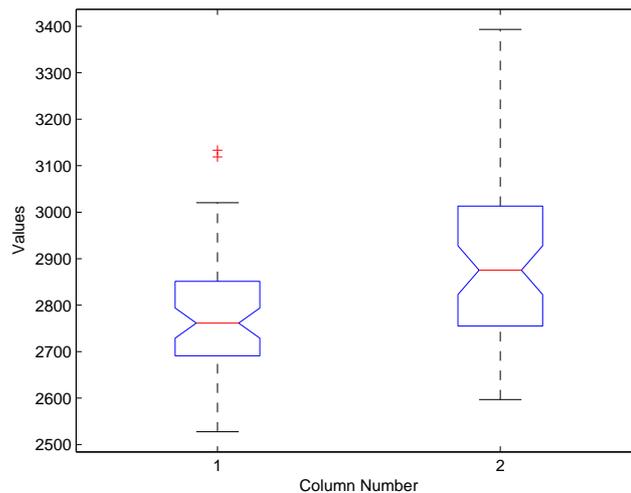


FIGURE 5.16 – Variabilité du  $C_{max}$

5.16). Cela signifie que nous avons gagné en « robustesse » du résultat global final. Par contre, les résultats suivants vont montrer le prix à payer pour ces gains si intéressants.

## En-cours de production - WIP

Cet indicateur correspond au stock moyen de toutes les références de produits confondues sur la période considérée. Il est calculé à chaque événement survenant dans la période. Sa moyenne est calculée à la fin de celle-ci.

Les graphes de la figure 5.17 sont présentés de la même manière que précédemment,

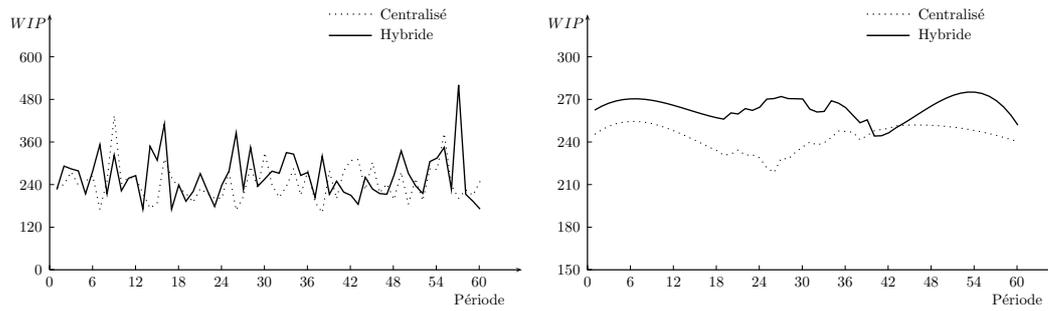


FIGURE 5.17 – Stock

TABLE 5.10 – Tableau ANOVA pour le Stock

Source	SS	df	MS	F	Prob > F
Colonnes	11787.8	1	11787.8	3.44	0.066
Error	403804.4	118	3422.1		
Total	415592.1	119			

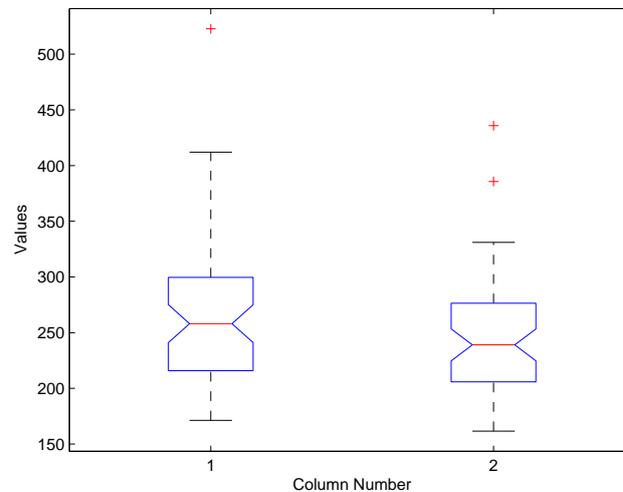


FIGURE 5.18 – Variabilité du WIP

à savoir, données brutes puis filtrées. Nous observons alors que nous payons en stock d'en-cours (mais ce résultat pouvait intuitivement être anticipé) ces gains de réduction de nervosité, de  $C_{max}$  et d'instabilité obtenus sans augmentation de coût global. Rappelons que le calcul du coût global ne prend pas en compte le stock d'en-cours. Pour autant notons encore que l'ANOVA permet de rejeter l'hypothèse nulle, mais ne met pas en évidence des différences aussi significatives (table 5.10). Mais notons (fig 5.18) que la variabilité du WIP a aussi augmenté.

## Nombre de décisions distribuées

Cet indicateur représente le nombre de décisions pertinentes trouvées par l'algorithme porté par les holons produits, indépendamment du nombre de calculs nécessaires pour y arriver. Ainsi le niveau de décision du cadran III (niveau le plus bas de VSM-SCP-PPP) pourra boucler plusieurs fois avant de trouver une solution. Ces boucles de calcul étant extrêmement rapides n'impactent pas significativement les temps de calcul. La figure 5.3.4 montre, pour chaque période, le nombre de solutions trouvées par le sous-système distribué ainsi que le nombre de calculs pour les trouver. Nous constatons que dans la quasi totalité des périodes, des solutions de reséquencement ont été trouvées. Notons, là encore, que nous ne pouvons pas comparer les résultats obtenus période par période au vu de cet indicateur et du  $C_{max}$ , par exemple, puisque les situations ne sont pas exactement les mêmes pour cause des distributions statistiques des paramètres du système.

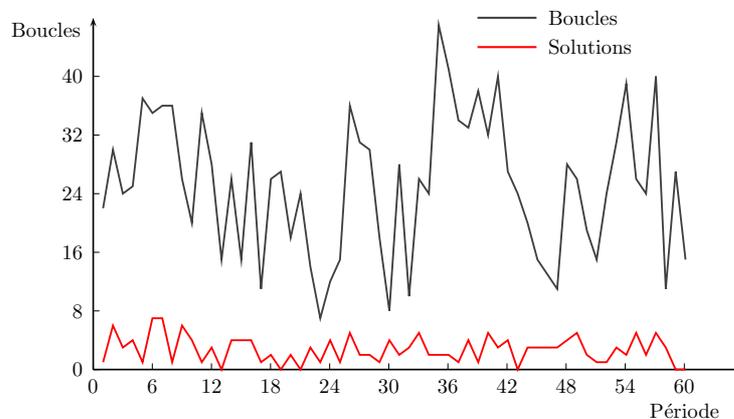


FIGURE 5.19 – Solutions distribuées

## 5.4 Conclusion

Nous avons, dans ce document, volontairement limité le nombre d'indicateurs pour montrer nos résultats. Notre objectif était de mettre en évidence l'apport d'un système hybride de type SCP pour l'amélioration de la réactivité d'un système industriel sans pour autant perturber l'organisation ni dégrader le coût global de fonctionnement de celui-ci. Les indicateurs globaux le mettent en avant et les indicateurs de flux montrent l'impact sur les caractéristiques mesurant la performance. Nous aborderons, par la suite, quelques éléments de perspectives dans la conclusion générale.

# Conclusion générale et perspectives

Ces travaux de thèse proposent un *système hybride*, nommé VSM-SCP permettant de piloter un système industriel dans lequel les produits peuvent être actifs tout en assurant une certaine stabilité des plans ainsi qu'une certaine agilité au niveau de l'atelier. Pour cela nous avons proposé dans un premier temps un cadre générique de modélisation qui s'appuie sur une proposition de S. Beer nommée VSM (Viable System Model). Puis, dans un deuxième temps, toute une architecture de modèles d'optimisation, pour certains centralisés, pour d'autres distribués et mis en œuvre par des agents logiciels, applicables pour chacun des niveaux du cadre générique.

Les deux premiers chapitres de la thèse ont décrit un état de l'art des systèmes de planification et de pilotage de la production, avec l'objectif d'identifier les forces et faiblesses des différentes approches proposées jusqu'à nos jours. Cet état des lieux a été fait pour les systèmes centralisés, puis pour les systèmes hybrides.

Le chapitre trois a présenté le cadre de modélisation proposé. Ce cadre est basé sur une approche cybernétique, et plus spécifiquement sur le modèle de système viable (VSM). La dernière partie du chapitre décrit l'application de ce cadre général aux systèmes de planification et pilotage de la production de type SCP. Nous l'avons nommé VSM-SCP.

Le chapitre quatre permet de présenter les différentes méthodes de décision, tant centralisées que distribuées, développées pour l'implémentation pour chacun des trois niveaux inférieurs du modèle VSM-SCP. Aux niveaux centralisés et distribués ces méthodes sont basées sur des modèles de programmation mathématique développés pour considérer l'adaptabilité et la flexibilité du système.

Le chapitre cinq a pu montrer tout l'intérêt de ce type d'hybridation pour le pilotage des systèmes industriels. Nous nous sommes appuyés sur un système d'indicateurs qui nous a permis de mettre en évidence les gains en stabilité et perte de nervosité obtenus grâce à l'action des produits dans le système hybride.

Nous avons proposé dans un cadre de modélisation général d'introduire de l'intelligence au niveau des produits. Celle-ci pourra être implémentée par l'utilisation de techniques d'apprentissage ou d'intelligence artificielle qui fourniront aux agents le nécessaire pour activer des méthodes de décision alternatives aux méthodes centralisées. De cette manière le système pourra travailler avec différentes approches pour mieux réguler la relation contrôle/autonomie.

Dans notre approche nous avons défini un cadre de modélisation dans le contexte du PPP à deux niveaux (tactique et opérationnel). Une autre perspective de recherche serait alors l'implémentation à d'autres niveaux, tels celui de l'exécution ou du niveau stratégique. Le niveau exécution est la suite logique de notre travail afin que les produits

puissent prendre des décisions relatives à la sélection de gammes alternatives de fabrication ou à la réaction à d'autres types de perturbations ou de contraintes. Le niveau stratégique concernerait la coordination entre les sites de production pour permettre une intégration plus large des opérations tout en conservant les principes du modèle SCP-VSM proposé.

Une autre perspective pour nos travaux serait l'exploration de l'application de cette approche à d'autres domaines d'application (hospitalier, administration, etc...). Enfin, nous avons aussi comme perspective d'implémenter nos modèles dans le système de contrôle de la plate-forme TRACILOGIS du site d'Epinal. Cela nécessitera d'adapter leurs formulations, en particulier pour le modèle de lot-streaming, au cas spécifique de ce système physique. Cela nous permettra aussi d'en étudier une forme de généralité.

Une autre piste de perspectives pour notre proposition résiderait dans l'intégration de différentes méthodes pour l'implémentation des fonctions définies dans le cadre VSM-SCP. Bien que nous ayons choisi l'implémentation par des méthodes de programmation mathématique, rien ne contraint l'utilisation d'autres approches (approches basées sur la stigmergie, les méta-heuristiques ou la « swarm intelligence ») aux différents niveaux. Le choix fait dans cette thèse d'utiliser des méthodes d'optimisation pourrait alors être utilisé comme élément de comparaison pour ces autres approches.

Ces travaux nous ont permis d'appréhender ce contexte industriel émergent que sont les SCP. Ces systèmes sont devenus crédibles depuis le développement spectaculaire des technologies de type Auto-ID, mais aussi par le fait que les derniers travaux de recherche montrent de plus en plus de voies pour implémenter l'intelligence au niveau des produits. Ces travaux de thèse, a permis d'évaluer la faisabilité et la pertinence d'un système de planification et de contrôle de la production de type hybride (centralisé/distribué). Cette implémentation n'a intégré que certaines des fonctions de l'architecture proposée dans le chapitre 3. En particulier, on a mis en application deux niveaux de décision (PDP et Ordonnancement). Dans les perspectives de ce travail l'intention est d'ajouter un niveau de plus qui correspondrait au niveau du PIC ainsi qu'un niveau inférieur correspondant aux décisions de sélection de machines basées sur le choix de gammes alternatives résultant de la coopération entre les holons produits.

Comme il a été expliqué dans le chapitre 3, la régulation entre centralisation et décentralisation, est obtenue par la régulation du degré de contrôle/autonomie. Pour cela l'autonomie est implémentée par une communauté d'agents qui ajustent la planification de façon décentralisée en utilisant des informations fournies et découlant des actions des holons produits. Ainsi, cette partie de l'architecture est mise oeuvre par un système multi-agents structuré selon une organisation récursive. Cette communauté d'agents pourra être implémentée grâce à la définition d'agents à chaque niveau de récursivité ou, au contraire, par la définition d'une seule classe d'agents qui prendrait des décisions conformément aux différents niveaux récursifs.

Comme il a été aussi montré dans le chapitre 3, l'utilisation de VSM comme base pour le cadre de modélisation proposé nous mène à définir un macro système avec la même structure que tous les sous-systèmes qui le composent. Ce macro système est basé sur la structure et l'organisation des êtres vivants. Bien que VSM nous permette de définir la structure et l'organisation de ce macro système vivant, une autre perspective de recherche sera l'étude des super-organismes réels ou artificiels qui peuvent s'adapter à l'architecture proposée. La poursuite de ces travaux de thèse pourra s'attacher à définir ces *super-*

---

*organismes*. Les colonies de fourmis pourront, par exemple, être envisagées pour leur définition. Après les années quatre-vingt, qui ont vu se développer les méta-heuristiques de colonies de fourmis, une série de variantes de ceux-ci sont apparues montrant de bons résultats pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire. Cependant, au vu de la littérature, l'étude de leur comportement en tant que super-organisme n'a pas été beaucoup étudié. Leur application dans le contexte des systèmes d'AI (Intelligence Artificielle) ou d'ALife (Vie Artificielle) semble donc pertinente.



# Annexe A

## Détails de l'application

### Diagramme de classes

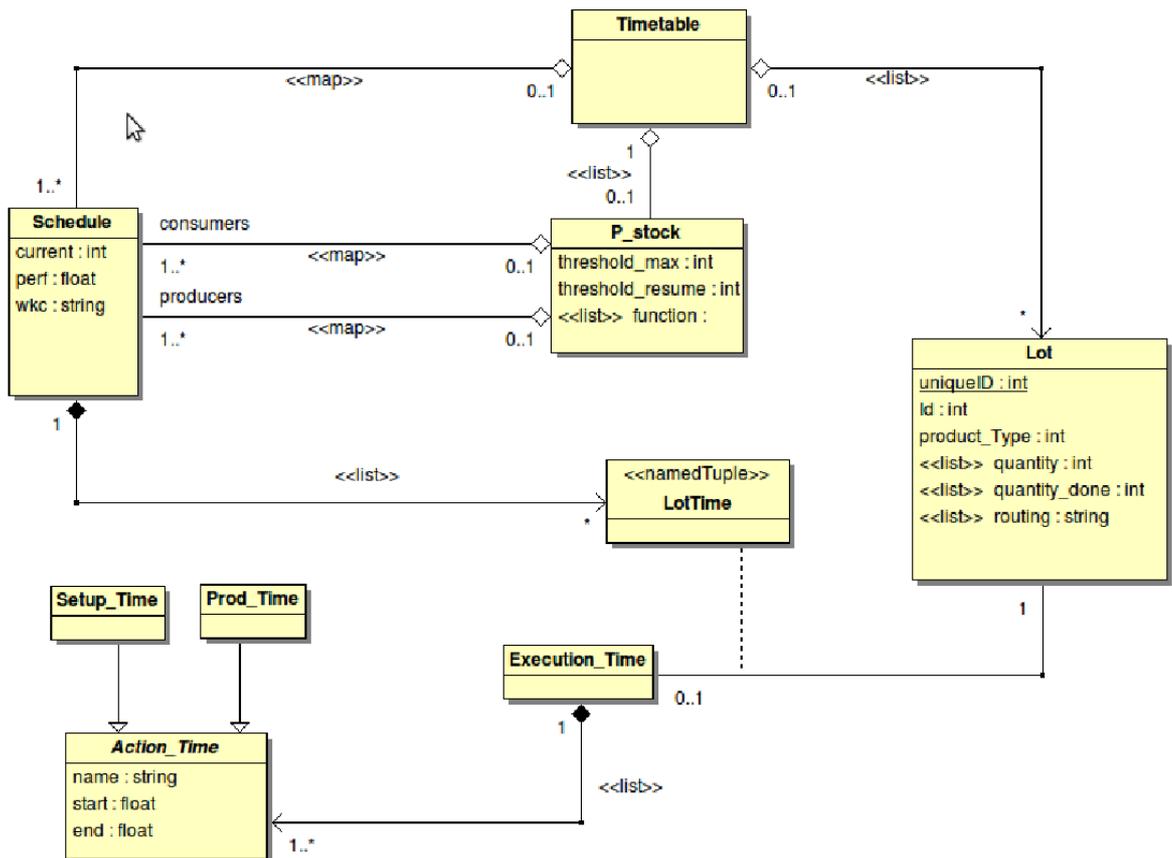


FIGURE A.1 – Diagramme de classes

## Diagramme d'activités

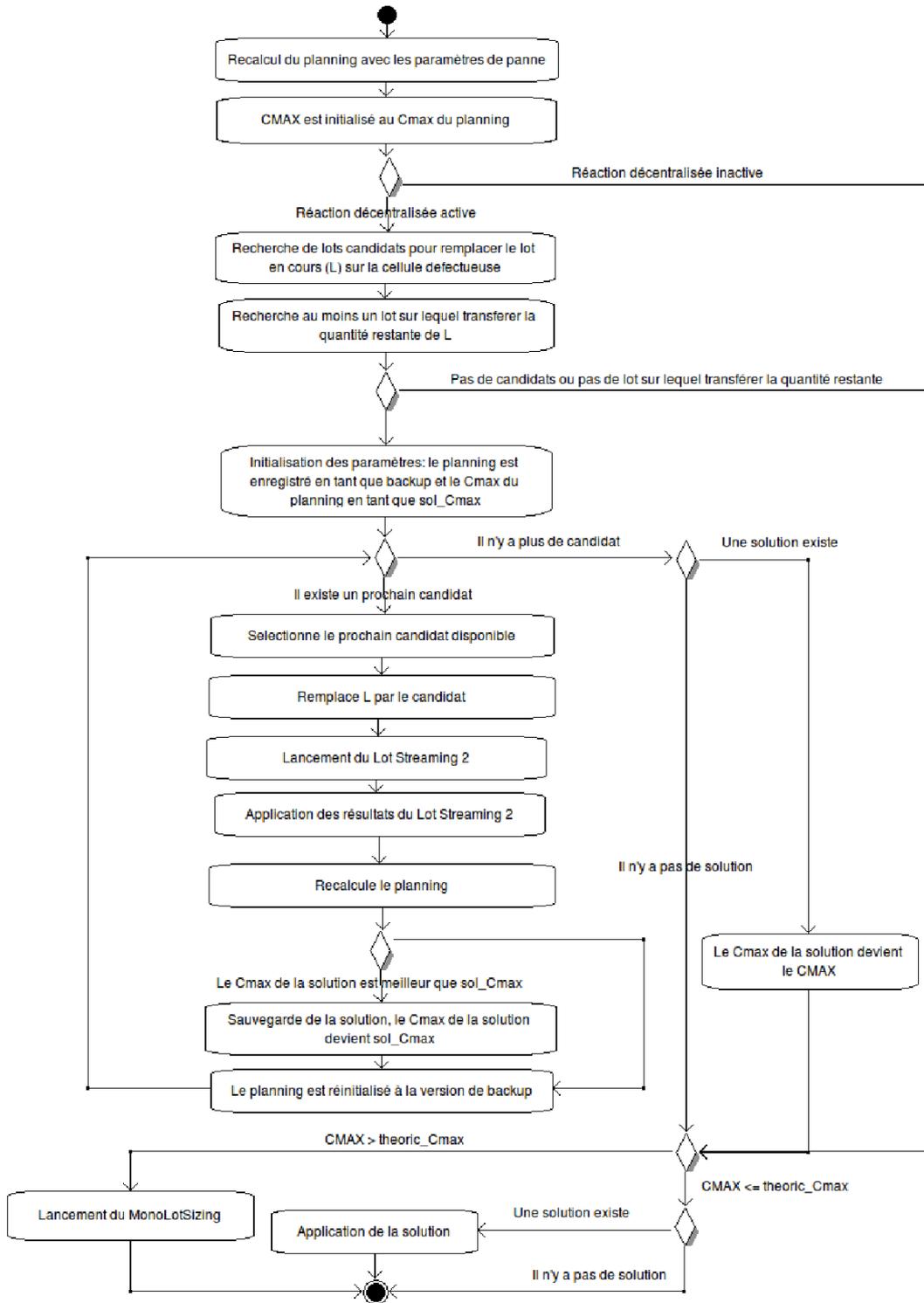


FIGURE A.2 – Diagramme d'activités décision distribuée

# Annexe B

## Modèles pour la minimisation de la nervosité

Dans cette section, nous proposons deux modèles de PLNE pour réduire de façon optimale les mesures de nervosité  $NG$  et  $NL$ . Pour obtenir ces valeurs, l'idée est d'augmenter le coût de production  $f_P$  en permettant une petite déviation et l'introduire comme une contrainte. En d'autres termes, le coût est plus grand quand la nervosité est réduite. En plus, quand la déviation du coût de production direct initial est minimale, la résolution du problème devient plus difficile en raison de la contrainte ajoutée, qui augmente le temps du calcul. Alors, un compromis doit être trouvé entre la réduction de nervosité voulue et le temps du calcul supplémentaire acceptable. Par la suite, le modèle PLNE  $M_{NG}$  est formulé pour optimiser la mesure  $NG$  et le modèle  $M_{NL}$  détermine la valeur optimale pour la mesure  $NL$ . Les deux modèles sont calculés pour chaque cycle  $k$  en considèrent les planifications des cycles de précédents. La minimisation de la nervosité par cette voie, a été déjà proposé dans (Kimms 1998) et (Kazan et al. 2000).

$$(M_{NG}) \quad \min f_{NG}^k = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{t=k}^{t'} z_{it}^l \quad (\text{B.1})$$

$$(4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n (p_{it}x_{it}^k + h_{it}s_{it}^k + b_{it}r_{it}^k + q_{it}y_{it}^k) \leq f_P^{k*}(1 + \delta) \quad (\text{B.2})$$

$$x_{it}^k - Q_{it}^{k-l} \leq z_{it}^l, \quad l \in [1, \dots, n-1], t \in [k, \dots, t'], i \in [1, \dots, m] \quad (\text{B.3})$$

$$Q_{it}^{k-l} - x_{it}^k \leq z_{it}^l, \quad l \in [1, \dots, n-1], t \in [k, \dots, t'], i \in [1, \dots, m] \quad (\text{B.4})$$

$$t' = n - k - 1 \quad (\text{B.5})$$

$$x_{it}^k, s_{it}^k, r_{it}^k, z_{it}^l \geq 0, y_{it}^k \in \{0, 1\} \quad (\text{B.6})$$

Dans ce modèle, la fonction objective (B.1) minimise la valeur absolue des différences entre les quantités de production  $x_{it}^k$  au cycle actuel ( $k$ ) et ces obtenus dans les cycles précédents ( $Q_{it}^{k-l}$ ). La contrainte (B.2) permet une détérioration du coût dans la limite de  $\delta\%$ . Il faut noter que le  $f_P^{k*}$  correspond au valeur obtenu par le calcul du modèle  $M_P$ ,

dans le cycle actuel, tel que les résultats du cycle précédent sont incorporés comme les conditions initiales dans le cycle suivant. Les contraintes (B.3) et (B.4) garantent la valeur absolue pour les variables  $z_{it}^l$ .

Dans le modèle ( $M_{NL}$ ), la fonction objectif  $f_{NL}$  permet de déterminer la mesure  $NL$ , laquelle correspond à la mesure de la nervosité locale.

$$(M_{NL}) \quad \min f_{NL}^k = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{n-1} z_{it}^l \quad (\text{B.7})$$

$$(4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n (p_{it}x_{it}^k + h_{it}s_{it}^k + b_{it}r_{it}^k + q_{it}y_{it}^k) \leq f_P^{k*}(1 + \delta) \quad (\text{B.8})$$

$$x_{it}^k - Q_{it}^{k-l} \leq z_{it}^l, \quad l \in [1, \dots, n-1], i \in [1, \dots, m], t = k \quad (\text{B.9})$$

$$Q_{it}^{k-l} - x_{it}^k \leq z_{it}^l, \quad l \in [1, \dots, n-1], i \in [1, \dots, m], t = k \quad (\text{B.10})$$

$$x_{it}^k, s_{it}^k, r_{it}^k, z_{it}^k \geq 0, y_{it} \in \{0, 1\} \quad (\text{B.11})$$

La fonction objectif (B.7) minimise les différences entre les quantités de la période actuelle  $t$  et ceux obtenus dans les cycles précédents pour la même période (avec  $\Delta t = 1 \implies t = k$ ). Comme dans le modèle  $M_{NG}$ , la contrainte (B.8) permet une détérioration de coûts dans la limite d'un  $\delta\%$ , et les contraintes (B.9) et (B.10) restreignent la variable  $z_{it}$  à sa valeur absolue.

# Glossaire

**CRAN** : Centre de Recherche en Automatique de Nancy  
**PIC** : Plan Industriel et Commercial  
**PDP** : Programme Directeur de Production  
**SCP** : Système Contrôlé par le Produit  
**VSM** : Viable System Model  
**PPP** : Planification et Pilotage de la Production  
**API** : Automates Programmables Industrielles  
**IAO** : Ingénierie Assistée par Ordinateur  
**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur  
**MRP1** : Material Requirement Planning  
**MRP2** : Manufacturing Resource Planning  
**APS** : Advanced Planning and Scheduling  
**APICS** : American Production and Inventory Control Society  
**PS** : Plan Stratégique  
**PE** : Plan d'Entreprise  
**IMS** : Intelligent Manufacturing Systems  
**JiT** : Just in Time  
**OPT** : Optimized Production Technology  
**TOC** : Theory of Constraints  
**CRM** : Customer Relationship Management  
**HPP** : Hierarchical Production Planning  
**CIM** : Computer Integrated Manufacturing  
**CAD** : Computer-Aided Design  
**CAE** : Computer-Aided Engineering  
**CAM** : Computer-Aided Manufacturing  
**CAPP** : Computer-Aided Process Planning  
**CAQ** : Computer-Aided Quality  
**CNC** : Computer Numerical Control  
**ASRS** : Automated Storage and Retrieval System  
**AGV** : Automated Guided Vehicle  
**ACS** : Automated Conveying Systems  
**HMS** : Holonic Manufacturing Systems  
**ACL** : Agent Communication Language  
**RFID** : Radio-Frequency IDentification  
**MES** : Manufacturing Execution System

**CBN** : Calcul des Besoins Nets

**FMS** : Flexible Manufacturing Systems

**BDI** : Belief, Desires and Intentions

**SFP** : Systèmes Flexibles de Production

**MHD** : Material Handling Devices

**CMM** : Control, Maintenance and technical Management

**B2M** : Agile Business to Manufacturing

**VIPLAN** : Viable Plan

# Bibliographie

- APICS (2008), *APICS Dictionary*, APICS.
- Armetta, F. (2006), Proposition d'une approche auto-organisationnelle pour le partage de ressources critiques, PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon I.
- Artigues, C. (2004), Optimisation et robustesse en ordonnancement sous contraintes de ressource : habilitation a diriger des recherches, PhD thesis, Université D'Avignon.
- Ashby, R. (1957), *An introduction to cybernetics*, Chapman and Hall, London.
- Babiceanu, R. & Chen, F. (2006), 'Development and applications of holonic manufacturing systems : a survey', *Journal of Intelligent Manufacturing* **17**(1), 111–131.
- Bajic, E. & Chaxel, F. (2002), Auto-id mobile information systems for vehicle life cycle data management, in 'Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics'.
- Barata, J., Camarinha-Matos, L. & Cândido, G. (2008), 'A multiagent-based control system applied to an educational shop floor', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **24**(5), 597–605.
- Beer, S. (1959), *Cybernetics and management*, English Universities Press, London.
- Beer, S. (1966), *Decision and control*, Wiley, Chichester.
- Beer, S. (1971), 'The liberty machine', *Futures* **3**, 338–348.
- Beer, S. (1972), *Brain of the firm : the Managerial cybernetics of organization*, Allen Lane the Penguin Press, London.
- Beer, S. (1984), 'The viable system model : Its provenance, development, methodology and pathology', *Journal of the Operational Research Society* **35**, 7–25.
- Belmokhtar, S., Herrera, C. & Thomas, A. (2010), A general approach for hierarchical production planning considering stability, In proceedings of 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2010).
- Bitran, G. & Hax, A. (1977), 'On the design of hierarchical production planning systems', *Decision Sciences* **8**(1), 28–55.
- Blackburn, J., & Millen, R. (1982a), 'The impact of a rolling schedule in a multi-level mrp system', *Journal of Operations Management* **2**(2), 125–135.
- Blackburn, J., & Millen, R. (1982b), 'Improved heuristics for multi-echelon requirements planning systems', *Management Science* **32**(4), 413–429.
- Blanc, P., Demongodin, I. & Castagna, P. (2008), 'A holonic approach for manufacturing execution system design : An industrial application', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21**, 315–330.

- Bongaerts, L., Monostori, L., McFarlane, D. & Kádár, B. (2000), 'Hierarchy in distributed shop floor control', *Computers in Industry* **43**(2), 123–137.
- Bongaerts, L., Van Brussel, H., Valckenaers, P. & Peeters, P. (1997), Reactive scheduling in holonic manufacturing systems : architecture, dynamic model and co-operation strategy, in 'Proceedings of ASI', Vol. 97, Citeseer, pp. 42–54.
- Chokshi, N. & McFarlane, D. (2008), 'A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations', *Journal of Intelligent Manufacturing* **19**(2), 215–232.
- Costanza, J. (1996), *The Quantum Leap In Speed To Market*, Institute of Technology, Inc.
- Covanich, W. & McFarlane, D. (2009), 'Assessing ease of reconfiguration of conventional and holonic manufacturing systems : Approach and case study', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **22**, 1015–1024.
- Créput, J.-C. (2008), Hybridation de metaheuristiques pour la résolution distribuée de problèmes d'optimisation spatialisés : habilitation a diriger des recherches, PhD thesis, Université de Bourgogne.
- Dauzère-Pérès, S. & Lasserre, J.-B. (2002), 'On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling ', *International Transactions in Operational Research* **9**, 779–793.
- El Haouzi, H. (2008), Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise TRANE, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Espejo, R. (2003), 'The viable system model a briefing about organisational structure', Website.  
\*<http://maine.gov/dhhs/btc/PDF/ViableSystemModel.pdf>
- Espejo, R. & Harnden, R. (1989), *The Viable System Model - Interpretations and Applications of Stafford Beer's VSM*, Wiley, Chichester.
- Falkenauer, E. (2005), Line balancing in the real world, in 'Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM', Vol. 5, pp. 360–370.
- Faratin, P., Sierra, C. & Jennings, N. (1998), 'Negotiation decision functions for autonomous agents', *Robotics and Autonomous Systems* **24**(3-4), 159–182.
- Fir (1998), *An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control*, ESPRIT Working Group on IMS.
- Fischer, K. (1999), 'Agent-based design of holonic manufacturing systems', *Robotics and Autonomous Systems* **27**(1-2), 3–13.
- Fischer, K., Müller, J. & Pischel, M. (1994), *Unifying control in a layered agent architecture*, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz.
- Forrester, J. (1961), *Industrial Dynamics*, MIT Press.
- Frey, D., Nimis, J., Wörn, H. & Lockemann, P. (2003), 'Benchmarking and robust multi-agent-based production planning and control', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **16**(4), 307–320.

- 
- Fromm, J. (2004), *The emergence of complexity*, Kassel university press.
- Genin, P. (2003), Planification tactique robuste avec usage d'un APS proposition d'un mode de gestion par plan de reference, PhD thesis, Ecole des Mines de Paris.
- Giebels, M. (2000), 'EtoPlan : a concept for concurrent manufacturing planning and control-Building holarchies for manufacture-to-order environments'.
- Golay, M. & Savitzky, A. (1964), 'Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures', *Analytical Chemistry* **36**(8), 1–627.
- Goldratt, E., Cox, J. & Whitford, D. (1992), *The goal : a process of ongoing improvement*, North River Press.
- Gou, L., Luh, P. & Kyoya, Y. (1998), 'Holonc manufacturing scheduling : architecture, cooperation mechanism, and implementation', *Computers in Industry* **37**, 213–231.
- Gouyon, D. (2004), Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Grishikashvili, E. (2005), IMPROMPTU : Software framework for self-healing middleware services, PhD thesis, Liverpool John Moores University.
- Hadeli, Valckenaers, P., Verstraete, P., Germain, S. B. & Van Brussel, H. (2006), 'A Study of System Nervousness in Multi-Agent Manufacturing Control System', *Engineering self-organising systems lecture notes in artificial intelligence* **3910**, 232–245.
- Hardwick, M. & Bolton, R. (1997), 'The industrial virtual enterprise', *Communications of the ACM* **40**(9), 59–60.
- Hax, A. (1977), Hierarchical Production Planning Systems., Technical report, Massachusetts Institut of Technology Cambridge Operations Research Center.
- Heragu, S., Graves, R., Kim, B. & St Onge, A. (2002), 'Intelligent agent based framework for manufacturing systems control', *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on* **32**(5), 560–573.
- Herrera, C. & Thomas, A. (2009a), Simulation of less master production schedule nervousness model, in 'Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing', pp. 1585–1590.
- Herrera, C. & Thomas, A. (2009b), Un modèle pour limiter la nervosité et l'instabilité du programme directeur de production, in 'Proceedings du 8ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2009)'.
- Herrera, C., Thomas, A., Belmokhtar, S. & Pannequin, R. (2011), A viable system model for product-driven systems, in 'IESM 2011', To appear : In proceeding of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM).
- Herrmann, C., Bergmann, L., Halubek, P. & Thiede, S. (2008), Lean production system design from the perspective of the viable system model, in M. Mitsuishi, K. Ueda & F. Kimura, eds, 'Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier', pp. 309–314.
- Jacobson, S., Shepherd, J., D'Aquila, M. & Carter, K. (2007), The erp market sizing report, 2006–2011, Technical report, AMR Research.

- Jouvin, D. (2003), *Délégation de Rôle et Architectures Dynamiques de Systèmes Multi-Agents Conversationnels*, PhD thesis, Université Lyon I – Claude Bernard.
- Kabak, K. & Ornek, A. (2009), ‘An improved metric for measuring multi-item multi-level schedule instability under rolling schedules’, *Computers & Industrial Engineering* **56**, 691–707.
- Kadipasaoglu, S. & Sridharan, V. (1995), ‘Alternative approaches for reducing schedule instability in multistage manufacturing under demand uncertainty’, *Journal of Operations Management* **13**, 193–211.
- Kärkkäinen, M., Holmström, J., Främling, K. & Artto, K. (2003), ‘Intelligent products : a step towards a more effective project delivery chain’, *Computers in Industry* **50**, 141–151.
- Karmarkar, U. (1986), *Integrating mrp with kanban/pull systems*, Technical report, Center for Manufacturing and Operations Management, Graduate School of Management, University of Rochester.
- Kazan, O., Nagi, R. & Rump, C. (2000), ‘New lot-sizing formulations for less nervous production schedules’, *Computers & Operations Research* **27(13)**, 1325–1345.
- Kim, H.-J., Ciupek, M., Buchholz, A. & Seliger, G. (2006), ‘Adaptive disassembly sequence control by using product and system information’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **22**, 267–278.
- Kimms, A. (1998), ‘Stability measures for rolling schedules with applications to capacity expansion planning, master production scheduling, and lot sizing’, *Omega* **26(3)**, 355–366.
- Klein, T. (2008), *Le kanban actif pour assurer l’interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué. Application à un industriel de l’ameublement*, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Koestler, A. (1968), *The ghost in the machine*, Macmillan.
- Krafcik, J. (1988), ‘Triumph of the lean production system’, *Sloan Management Review* **30(1)**, 41–52.
- Kropp, D., Carlson, R. & Jucker, J. (1979), ‘Use of dynamic lot-sizing to avoid nervousness in material requirements planning systems’, *Production and Inventory Management* **20**, 49–78.
- Le Moigne, J.-L. (1974), *Les systèmes de décision dans les organisations*, PUF.
- Leitão, P. (2004), *An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control*, PhD thesis, University of Porto.
- Leitão, P. (2009), ‘Agent-based distributed manufacturing control : A state-of-the-art survey’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **22(7)**, 979–991.
- Leitão, P. & Restivo, F. (2006), *A Holonic approach to dynamic manufacturing scheduling*, Vol. 220 of *IFIP International Federation for Information Processing : Information Technology for Balanced Manufacturing Systems*, Shen, W., chapter 5, pp. 37–46.
- Leitão, P. & Restivo, S. (2008), ‘A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **24(5)**, 625–634.

- 
- Lima, R., Sousa, R. & Martins, P. (2006), ‘Distributed production planning and control agent-based system’, *International journal of production research* **44**(18), 3693–3709.
- Marik, V., Pechoucek, M., Stepankova, O. & Lazansky, J. (2000), ‘Proplant : Multiagent system for production planning’, *Applied Artificial Intelligence* **14**(7), 727–762.
- Maturana, F., Shen, W. & Norrie, D. (1999), ‘MetaMorph : an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing’, *International Journal of Production Research* **37**(10), 2159–2173.
- Maturana, F., Staron, R., Tichy, P., Vrba, P., Rischar, C., Mařík, V. & Hall, K. (2006), ‘An Agent-OS for Autonomous Cooperative Systems’, *Information Technology For Balanced Manufacturing Systems* pp. 29–36.
- Mařík, V. & Lažanský, J. (2007), ‘Industrial applications of agent technologies’, *Control Engineering Practice* **15**, 1364–1380.
- Mařík, V. & McFarlane, D. (2005), ‘Industrial adoption of agent-based technologies’, *IEEE Intelligent Systems* **20**, 27–35.
- McFarlane, D. (2002), Product identity and its impact on discrete event observability, in ‘Proceedings of the European Control Conference (ECC)’.
- McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J., Wong, C. & Ashton, K. (2002), ‘The intelligent product in manufacturing control’, *Journal of EAIA* **5464**.
- McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J., Wong, C. & Ashton, K. (2003), ‘Auto ID systems and intelligent manufacturing control’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **16**(4), 365–376.
- Mella, P. (2009), *The Holonic Revolution Holons, Holarchies and Holonic Networks, The Ghost in the Production Machine*, Pavia University Press, Pavia.
- Meyer, G., Främling, K. & Holmström, J. (2009), ‘Intelligent products : A survey’, *Computers in Industry* **60**, 137–148.
- Monteiro, T., Roy, D., Anciaux, D. et al. (2007), ‘Multi-site coordination using a multi-agent system’, *Computers in industry* **58**(4), 367–377.
- Morel, G., Panetto, H., Zaremba, M. & Mayer, F. (2003), ‘Manufacturing enterprise control and management system engineering : paradigms and open issues’, *Annual Reviews in Control* **27**, 199–209.
- Morel, G., Valckenaers, P., Faure, J.-M., Pereira, C. E. & Diedrich, C. (2007), ‘Manufacturing plant control challenges and issues’, *Control Engineering Practice* **15**, 1321–1331.
- Morin, E. (1981), *La Nature de la nature*, Le Seuil, Nouvelle édition, coll. Points.
- Murthy, S., Akkiraju, R., Rachlin, J. & Wu, F. (1997), Agent-based cooperative scheduling, in ‘Proceedings of AAAI Workshop on Constraints and Agents’, pp. 112–117.
- Nigro, G., Diega, S., Perrone, G. & Renna, P. (2003), ‘Coordination policies to support decision making in distributed production planning’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **19**(6), 521–531.
- Ortiz, V. (2005), Proposition d’un modèle de désagrégation pour un plan tactique stable dans le contexte de Chaîne Logistique et de l’usage d’un APS, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.

- Panjaitan, S. & Frey, G. (2006), Product-driven control in manufacturing systems using iec 61499 and rfid technology, in 'INCOM 06', Vol. 2 of *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (incom 2006)*, pp. 143–148.
- Pannequin, R. (2007), Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures et de pilotage par le produit de systèmes de production, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Pannequin, R., Morel, G. & Thomas, A. (2007), 'Benchmarking issues for product-driven decision-making', *9th International Conference on the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprise, MITIP'2007*. .
- Pannequin, R., Morel, G. & Thomas, A. (2009), 'The performance of product-driven manufacturing control : An emulation-based benchmarking study', *Computers in Industry* **60(3)**, 195–203.
- Pechoucek, M., Reháč, M., Charvát, P., Vlcek, T. & Kolar, M. (2007), 'Agent-based approach to mass-oriented production planning : Case study', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C* **37(3)**, 386–395.
- Pechoucek, M., Riha, A., Vokrinek, J., Marik, V. & Prazma, V. (2002), 'Explantech : applying multi-agent systems in production planning', *International Journal of Production Research* **40(15)**, 3681–3692.
- Petin, J.-F., Iung, B. & Morel, G. (1998), 'Distributed intelligent actuation and measurement (iam) system within an integrated shop-floor organisation', *Computers in Industry* **37**, 197–211.
- Pro (2001), *An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems*, IEEE.
- Pujawan, I. (2004), 'Schedule nervousness in a manufacturing system : a case study', *Production Planning & Control* **15(5)**, 515–524.
- Rais, S., Sugimura, N. & Kokubun, A. (2002), 'Study on process planning system for holonic manufacturing : (selection of machining sequences and sequences of machining equipment)', *JSME international journal. Series C, Mechanical systems, machine elements and manufacturing* **45(2)**, 527–533.
- Ribeiro-Justo, G., Saleh, A. & Karran, T. (2007), 'Intelligent reconfiguration of dynamic distributed components', *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.* **180**, 91–106.
- Rosenkranz, C., Holten, R. & Laumann, M. (2008), Designing ic structures by variety engineering, in 'SAC'08 : Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing', pp. 518–523.
- Sallez, Y., Trentesaux, D., Berger, T. & Tahon, C. (2004), 'Product-based and resource-based heterarchical approaches for dynamic FMS scheduling', *Computers & Industrial Engineering* **46(4)**, 611–623.
- Sarin, S. & Jaiprakash, P. (2007), *Flow Shop Lot Streaming*, Springer, New York.
- Shen, W., Hao, Q., Yoon, H. & Norrie, D. (2006), 'Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing : An updated review', *Advanced Engineering Informatics* **20(4)**, 415–431.

- 
- Simão, J. (2005), A Contribution to the development of a HMS simulation tool and proposition of a meta-model for holonic control, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Simão, J., Stadzisz, P. & Morel, G. (2006), 'Manufacturing execution systems for customized production', *Journal of Materials Processing Technology* **179**(1-3), 268–275.
- Sluga, A., Butala, P. & Peklenik, J. (2001), 'Self-organization in a distributed manufacturing system based on constraint logic programming', *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **50**(1), 323–326.
- Sridharan, S. & Berry, W. (1990), 'Freezing the master production schedule under demand uncertainty', *Decision Sciences* **21**, 97–120.
- Sridharan, S., Berry, W. & Udayabhanu, V. (1988), 'Measuring master production schedule stability under rolling planning horizons', *Decision Sciences* **19**(1), 147–166.
- Sridharan, S. & LaForge, R. (1990), 'An analysis of alternative policies to achieve schedule stability', *Journal of Manufacturing and Operations Management* **3**, 53–73.
- Sridharan, V. & Kanet, J. (1995), 'Production planning and control systems - state of the art and new directions', *Information Management in Computer Integrated Manufacturing* pp. 195–216.
- Stadler, H. & Kilger, C. (2002), 'Supply Chain Management and Advanced Planning-Concepts, Models, Software and Case Studies'.
- Sugimura, N., Shrestha, R. & Inoue, J. (2003), Integrated process planning and scheduling in holonic manufacturing systems-Optimization based on shop time and machining cost, in 'Assembly and Task Planning, 2003, Proceedings of the IEEE International Symposium on', IEEE, pp. 36–41.
- Sugimura, N., Shrestha, R., Tanimizu, Y. & Iwamura, K. (2007), 'A study on integrated process planning and scheduling system for holonic manufacturing', *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing* pp. 311–334.
- Te'eni, D., Carey, J. & Zhang, P. (2007), *Human computer interaction : developing effective organizational information systems*, John Wiley & Sons, Inc.
- Tennant, G. (2001), *SIX SIGMA : SPC and TQM in Manufacturing and Services*, Gower Publishing, Ltd.
- Tharumarajah, A. (1996), 'Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **9**(3), 217–226.
- Thomas, A. (2004), De la planification au pilotage pour les chaines logistiques : habilitation a diriger des recherches, PhD thesis, UHP NANCY I.
- Thomas, A., Castagna, P., Blanc, P., Cardin, O., El Haouzi, H., Klein, T. & Pannequin, R. (2008), *Simulation for Product Driven Systems*, Wiley, pp. 221–255.
- Thomas, A., Genin, P. & Lamouri, S. (2008), 'Mathematical programming approaches for stable tactical and operational planning in supply chain and aps context', *Journal of Decision Systems* **17**, 425–455.

- Thompson, R.-J., Laws, A.-G., Reilly, D.-J., Taleb-Bendiab, A. & Llewellyn-Jones, D. (2009), Towards viable computer systems : a set theory interpretation of ecological dependence within beer's self-organizing viable system model, *in* 'MEDES '09 : Proceedings of the International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems', pp. 73–77.
- Trentesaux, D. (2007), 'Les systèmes de pilotage hétérarchiques : Innovations réelles ou modèles stériles?', *Journal européen des systèmes automatisés* **41(9-10)**, 1165–1202.
- Truszkowski, W. & Karlin, J. (2000), A cybernetic approach to the modeling of agent communities, *in* 'CIA '00 : Proceedings of the 4th International Workshop on Cooperative Information Agents IV, The Future of Information Agents in Cyberspace', pp. 166–178.
- Ueda, K. (1992), A concept for bionic manufacturing systems based on DNA-type information, *in* 'Proceedings of the IFIP TC5/WG5. 3 Eight International PROLAMAT Conference on Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing', North-Holland Publishing Co., pp. 853–863.
- Ueda, K. (2001), 'Emergent synthesis methodologies for manufacturing', *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **50(2)**, 535–551.
- Ueda, K. (2007), 'Emergent synthesis approaches to biological manufacturing systems', *Digital Enterprise Technology* pp. 25–34.
- Valckenaers, P., Brussel, H. V., Verstraete, P., Germain, B. S. & Hadeli (2007), 'Schedule execution in autonomic manufacturing execution systems', *Journal of manufacturing systems* **26(2)**, 75–84.
- Valckenaers, P., Cavalieri, S., Germain, B., Verstraete, P., Hadeli, Bandinelli, R., Terzi, S. & Brussel, H. (2006), 'A benchmarking service for the manufacturing control research community', *Journal of Intelligent Manufacturing* **17(6)**, 667–679.
- Valckenaers, P. & Van Brussel, H. (2005), Holonic manufacturing execution systems, *in* 'CIRP annals', Vol. 54 of *General Assembly of CIRP No55*, pp. 427–432.
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Hadeli, Bochmann, O., Saint Germain, B., Zamfirescu, C. et al. (2003), 'On the design of emergent systems : an investigation of integration and interoperability issues', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **16(4)**, 377–393.
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L. & Peeters, P. (1998), 'Reference architecture for holonic manufacturing systems : PROSA', *Computers in industry* **37(3)**, 255–274.
- Van Dyke Parunak, H. (1987), 'Manufacturing experience with the contract net', *Distributed artificial intelligence* **1**, 285–310.
- Van Dyke Parunak, H. (1994), *Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry*, Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Wiley Inter-Science, chapter 4.
- Van Dyke Parunak, H. (1998), What can agents do in industry, and why? An overview of industrially-oriented R&D at CEC, Cooperative information agents II : learning, mobility and electronic commerce for information discovery on the Internet, *in* 'Second International Workshop, CIA', Vol. 98.

- 
- Van Dyke Parunak, H., Baker, A. & Clark, S. (1997), The aaria agent architecture : an example of requirements-driven agent-based system design, *in* 'In Proceeding of AGENTS '97 First international conference on Autonomous agents'.
- Van Dyke Parunak, H., White, J., Lozo, P., Judd, R., Irish, B. & Kindrick, J. (1986), An Architecture for Heuristic Factory Control, *in* 'American Control Conference, 1986', IEEE, pp. 548–558.
- Verstraete, P., Valckenaers, P., Van Brussel, H., Saint Germain, B., Hadeli, K. & Van Belle, J. (2008), 'Towards robust and efficient planning execution', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21**, 304–314.
- Villa, A. (1989), 'Decision architectures for production planning in multi-stage multi-product manufacturing systems', *Annals of Operations Research* **17**(1), 51–67.
- Vollman, T., Berry, W. & Whybark, D. (1997), *Manufacturing Planning and Control Systems*, McGraw-Hill, New York.
- Vrba, P., Macůrek, F. & Mařík, V. (2008), 'Using radio frequency identification in agent-based control systems for industrial applications', *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21**, 331–342.
- Waldner, J.-B. (1992), *Principles of Computer-Integrated Manufacturing*, John Wiley & Sons.
- Wang, L. & Lin, S. (2009), 'A multi-agent based agile manufacturing planning and control system', *Computers & Industrial Engineering* **57**(2), 620–640.
- Warnecke, H. (1993), 'The Fractal Company'.
- Watanabe, M., Matsumoto, Y., Ohnari, H., Matoba, H. & Matsuzaki, K. (1991), Intelligent manufacturing planning system, *in* 'Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON 91)', IEEE.
- Wong, C., McFarlane, D., Zaharudin, A. & Agarwal, V. (2002), The intelligent product driven supply chain, *in* 'Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on', Vol. 4, IEEE, pp. 6–pp.
- Wooldridge, M. (2000), *Reasoning about rational agents*, MIT press.
- Wooldridge, M. & Jennings, N. (1995), 'Agent theories, architectures, and languages : a survey', *Intelligent agents* pp. 1–39.
- Wullink, G., Giebels, M. & Kals, H. (2002), 'A system architecture for holonic manufacturing planning and control (EtoPlan)', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **18**(3-4), 313–318.
- Wunsch, D. & Bratukhin, A. (2007), Multilevel order decomposition in distributed production, *in* 'Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on', IEEE, pp. 872–879.
- Xie, J., Lee, T. & Zhao, X. (2004), 'Impact of forecasting error on the performance of capacitated multi-item production systems', *Computers & Industrial Engineering* **46**(2), 205–219.
- Xie, J., Zhao, X. & Lee, T. (2003), 'Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty', *International Journal of Production Economics* **83**(1), 65–84.

- Yoshikawa, H. (1995), 'Manufacturing and the 21st century—Intelligent manufacturing systems and the renaissance of the manufacturing industry', *Technological Forecasting and social change* **49**(2), 195–213.
- Zhao, X. & Lam, K. (1997), 'Lot-sizing rules and freezing the master production schedule in material requirements planning systems', *International Journal of Production Economics* **53**(3), 281–305.
- Zins, C. (2007), 'Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge : Research articles', *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* **58**, 479–493.

## Résumé

Cette thèse rappelle les fondements du pilotage des systèmes logistiques et montre l'intérêt de la mise en place d'un SCP (Systèmes Contrôlés par le Produit). L'intégration de tels systèmes doit d'abord prendre en compte la cohérence entre les différents éléments le constituant. Ainsi les systèmes centralisés cherchent à proposer des plans de moyen, long termes visant un optimal de coût, mais aussi une certaine stabilité et peu de nervosité. Par ailleurs, les systèmes distribués ont démontré leur capacité à permettre une réaction rapide à des événements imprévisibles survenant dans le système physique. L'hybridation de ces deux types de pilotage est donc une voie de gain de productivité pour les systèmes logistiques et industriels.

Le premier chapitre de la thèse décrit l'évolution des systèmes de planification et de pilotage de la production, avec l'objectif d'identifier les forces et faiblesses des différentes approches proposées jusqu'à nos jours et permettent de définir l'objectif général de la thèse.

Le chapitre deux analyse l'état de l'art concernant les outils de modélisation des systèmes de production centralisés/distribués et aussi le concept de contrôle par le produit. Ce chapitre sert de base pour définir les objectifs spécifiques de la thèse.

Le chapitre trois présente le cadre de modélisation proposé. Ce cadre est basé sur une approche cybernétique, et plus spécifiquement sur le modèle de système viable (VSM). Le chapitre démarre avec une présentation générale du modèle de système viable, puis présente un modèle générique de modélisation de systèmes contrôlés par le produit. Enfin, le chapitre décrit une application de ce cadre général aux systèmes de planification et pilotage de la production de type SCP.

Le chapitre quatre définit les différentes méthodes de décision, tant centralisées que distribuées, développées pour l'implémentation du modèle générique défini dans le chapitre trois. Aux niveaux centralisés et distribués ces méthodes sont basées sur des modèles de programmation mathématique développés pour considérer l'adaptabilité et la flexibilité du système.

Le chapitre cinq montre les principaux résultats grâce à une application basée sur un cas industriel qui a nécessité le développement d'un outil de simulation qui considère des variables de court, moyen et long termes pour les différents modèles d'optimisation. Ces résultats montrent l'intérêt de ce type d'hybridation.

**Mots-clés:** Gestion de la production, Logistique, Planification, Cybernétique, Modèle de Système Viable.

## Abstract

This thesis is concerned with the foundations of the planning and control logistics systems and shows the interest of the PDS (Product-driven Systems). The development of such systems must consider the coherence between its different components. Centralized systems offer long term plans aiming optimal cost, but also stability and nervousness reduction. Distributed systems allow a fast reaction to perturbations occurring in the physical system (on the shop-floor or in the supply chain). Then, the hybridization of these two control systems is a way to increase productivity for logistic and industrial systems.

The first chapter of the thesis describes the evolution of the production planning and control systems, to identify strengths and weaknesses of the different approaches proposed until our days and allow to define the general objective of the thesis.

Chapter two analyses the state of the art concerning the tools for modeling such hybrid centralized/distributed systems and also the concept of product-driven systems (PDS). This chapter serves as a basis to define the specific objectives of the thesis.

Chapter three introduces the proposed modeling framework. This framework is based on a cybernetic approach, and more specifically on the Viable System Model (VSM). The chapter starts with a general presentation of VSM and then introduces a generic framework to model PDS. Finally, this chapter describes an application for production planning and control.

Chapter four defines the different decision methods developed for the implementation of the generic model defined in the chapter three. At centralized and distributed levels these methods are based on mathematical programming models.

Chapter five shows the main results of an application based on an industrial case which required the development of a simulation tool which considers short, medium and long terms variables for the different optimization models. These results show the interest of this type of hybridization.

**Keywords:** Production Management, Logistics, Planning, Cybernetics, Viable System Model.