

THÈSE

présentée par

Karim TAMANI

pour obtenir le diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : Electronique – Electrotechnique – Automatique

Développement d'une méthodologie de pilotage intelligent par régulation de flux adaptée aux systèmes de production

Soutenue le 6 Juin 2008 devant le jury composé de :

M. Henri PIERREVAL	Rapporteur	Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA)
M. Bernard GRABOT	Rapporteur	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT)
M. Alexandre DOLGUI	Examineur	Professeur à l'Ecole Nationale des Mines de Saint-Etienne (ENMSE)
M. Jacky MONTMAIN	Examineur	Professeur à l'Ecole des Mines d'Alès (EMA)
M. Damien TRENTESAUX	Examineur	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
M. Reda BOUKEZZOULA	Co-directeur de thèse	Maître de Conférences à l'Université de Savoie
M. Georges HABCHI	Directeur de thèse	Professeur à l'Université de Savoie

Préparée au sein du LISTIC

Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance

A mes chers parents...

REMERCIEMENTS

Ce travail de doctorat a été réalisé au sein du LISTIC – Laboratoire d’Informatique, Systèmes, Traitement de l’Information et de la Connaissance – à Polytech’ Savoie d’Annecy (Université de Savoie) dans le cadre d’une allocation ministérielle MENRT. Je tiens à remercier Monsieur Philippe Bolon, Professeur à l’Université de Savoie, pour m’avoir accueilli au sein de son laboratoire.

J’adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Henri Pierreval, Professeur à l’IFMA de Clermont-Ferrand et à Monsieur Bernard Grabot, Professeur à l’ENI de Tarbes, pour l’honneur qu’ils m’ont fait en acceptant de rapporter ce travail. Je leur suis également très reconnaissant pour les nombreuses remarques et suggestions qu’ils ont apportées.

Je tiens également à remercier Monsieur Alexandre Dolgui, Professeur à l’Ecole des Mines de Saint-Etienne qui m’a fait l’honneur de présider le jury, ainsi que Monsieur Jacky Montmain, Professeur à l’Ecole des Mines d’Alès, et Monsieur Damien Trentesaux, Professeur à l’Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, pour avoir accepté de faire partie de ce jury. Je leur exprime ici mes sincères remerciements pour l’intérêt qu’ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l’examiner.

Je ne remercierai jamais assez mes directeurs de thèse : Monsieur Reda Boukezzoula, Maître de Conférences à l’Université de Savoie et co-directeur de thèse, et Monsieur Georges Habchi, Professeur à l’Université de Savoie et directeur de thèse, pour la confiance qu’ils m’ont accordée. Persévérance et rigueur scientifique sont certainement les principaux enseignements qu’ils m’ont été prodigués tout au long de ces années de thèse. Un grand merci à Reda pour ses critiques toujours très constructives durant le déroulement de la thèse et au moment de la rédaction, et pour son perfectionnisme qui ont rendu ce manuscrit plus compréhensible. Egalement, à Georges qui, sans ses conseils, son expérience, sa disponibilité et ses nombreuses suggestions, ce travail n’aurait jamais abouti.

Que tous les membres du laboratoire LISTIC et l’ensemble des doctorants et personnels de Polytech’ Savoie d’Annecy que j’ai pu connaître durant toutes ces années, trouvent ici mes remerciements les plus chaleureux. Leur amitié et sympathie m’ont permis de travailler dans un contexte agréable.

Enfin, je remercie de tout cœur tous mes proches pour la confiance, le soutien et l’aide qu’ils m’ont apportés pendant toute la durée de cette thèse.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE 1 : MODELISATION ET SIMULATION DES FLUX DE PRODUCTION	19
1. INTRODUCTION	19
2. LES SYSTEMES DE PRODUCTION	19
3. CLASSIFICATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	20
3.1. CLASSIFICATION SELON LA NATURE ET LE VOLUME DES FLUX PHYSIQUES	21
3.2. CLASSIFICATION SELON LE MODE DE PILOTAGE	22
3.3. DISCUSSION	22
4. DECOMPOSITION ET ORGANISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION	23
4.1. ORGANISATION PHYSIQUE DES RESSOURCES	23
4.2. ORGANISATION LOGIQUE DES RESSOURCES	25
4.2.1. Processus de transformation	25
4.2.2. Processus d'assemblage	26
4.2.3. Processus de désassemblage	26
4.2.4. Autres organisations logiques	27
5. MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION A FLUX DISCRET	28
5.1. SYSTEMES ET MODELES	28
5.1.1. Système : définition	28
5.1.2. Modèle : définition	29
5.2. REPRESENTATION DES SFD PAR MODELES A EVENEMENTS DISCRETS	29
5.3. APPROXIMATION DES SFD PAR MODELE CONTINU (FLUIDE)	30
5.4. DISCUSSION	31
5.5. MODELE A FLUX CONTINU DIT « FLUIDE »	33
5.5.1. Cas mono-produit et mono-opération par machine	33
5.5.2. Exemple d'illustration	37
5.5.3. Cas mono-produit et multi-opération par machine	38
5.5.4. Cas multi-produit, multi-operation par machine	39
6. ANALYSE ET EVALUATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION	39
6.1. ANALYSE ET EVALUATION PAR MODELE ANALYTIQUE	40
6.1.1. Les méthodes d'agrégation	41
6.1.2. Les méthodes de décomposition	42
6.2. ANALYSE ET EVALUATION PAR MODELE DE SIMULATION	43
6.2.1. La simulation discrète (à événements discrets)	44
6.2.2. La simulation continue	51
7. CONCLUSION	55
CHAPITRE 2 : COMMANDE LOCALE DES FLUX DE PRODUCTION	59
1. INTRODUCTION	59

2. PILOTAGE DES SYSTEMES DE PRODUCTION	60
3. PROBLEMATIQUE DE PILOTAGE DES FLUX DE PRODUCTION	62
4. TYPOLOGIE DES STRUCTURES DE PILOTAGE	63
4.1. L'ARCHITECTURE CENTRALISEE	63
4.2. L'ARCHITECTURE HIERARCHISEE ET/OU COORDONNEE	63
4.3. L'ARCHITECTURE DISTRIBUEE	64
4.4. L'ARCHITECTURE DISTRIBUEE-SUPERVISEE	65
5. METHODOLOGIE DE SYNTHESE DE LA COMMANDE LOCALE	66
5.1. CLASSIFICATION DES METHODES DE PILOTAGE DES FLUX	66
5.1.1. Pilotage à base de jetons	67
5.1.2. Pilotage à base de temps	68
5.1.3. Pilotage à base de surplus	69
5.2. PILOTAGE CONVENTIONNEL A BASE DE SURPLUS	70
5.2.1. Pilotage d'un module de production isolément	71
5.2.2. Pilotage d'un module de production en interaction	73
5.2.3. Pilotage d'un système de production à <i>N</i> -modules élémentaires	75
6. PILOTAGE INTELLIGENT A BASE DE SURPLUS	76
6.1. CONTROLEURS A BASE DE RESEAUX DE NEURONES	77
6.2. CONTROLEURS FLOUS	79
7. STRATEGIE DE CONTROLE FLOU A BASE DE SURPLUS	81
7.1. CONTROLEURS DE TYPE MAMDANI	81
7.1.1. Principe	81
7.1.2. Illustration	83
7.2. CONTROLEURS DE TYPE SUGENO	86
7.2.1. Principe	86
7.2.2. Illustration	87
7.3. DISCUSSION	88
7.4. ANALYSE ET SYNTHESE D'UN CONTROLEUR DE SUGENO	90
7.4.1. Définition des univers de discours	91
7.4.2. Partitionnement des univers de discours	93
7.4.3. Base de règles et représentation entrée-sortie floue	94
7.5. PROPRIETES DU SYSTEME DE PILOTAGE	96
7.5.1. Contrôlabilité	96
7.5.2. Faisabilité	97
7.5.3. Stabilité	97
8. EXEMPLE ILLUSTRATIF	98
9. GENERALISATION DE LA STRUCTURE DE COMMANDE LOCALE	105
10. CONCLUSION	105
CHAPITRE 3 : SUR LA SUPERVISION DANS LE PILOTAGE DES FLUX DE PRODUCTION	109
1. INTRODUCTION	109

2. PROBLEMATIQUE DE LA SUPERVISION	109
2.1. SUPERVISION PAR ADAPTATION ET MODIFICATION DE LA COMMANDE LOCALE	110
2.2. SUPERVISION PAR AJOUT DE COMPOSANTE A LA COMMANDE LOCALE	111
2.3. DISCUSSION	111
3. STRUCTURE DE CONTROLE ET DE SUPERVISION ADOPTEE	112
3.1. DEFINITION ET REPRESENTATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE	112
3.2. PRINCIPE DE CONCEPTION D'UN SUPERVISEUR	113
4. METHODOLOGIE DE CONCEPTION DU SUPERVISEUR	116
4.1. SUPERVISEUR A BASE D'AGREGATION PAR REGLES FLOUES	116
4.1.1. Principe	116
4.1.2. Exemple illustratif	119
4.2. SUPERVISEUR A BASE D'OPERATEURS D'AGREGATION	122
4.2.1. Mécanisme de supervision par agrégation des actions	126
4.2.1.1. Conception à base d'intervalles conventionnels	126
4.2.1.2. Conception à base d'intervalles flous	135
4.2.2. Mécanisme de supervision par agrégation des objectifs	144
4.2.2.1. Agrégation des objectifs	145
4.2.2.2. Construction de l'action de supervision	147
4.2.2.3. Exemple illustratif	147
5. CONCLUSION	150
CHAPITRE 4 : APPLICATIONS ET RESULTATS DE SIMULATION	155
1. INTRODUCTION	155
2. LES SYSTEMES MULTI-PRODUITS	155
2.1. HYPOTHESES ET POSITIONNEMENT DU PROBLEME	155
2.2. DECOMPOSITION ET ALLOCATION DE CAPACITE	156
2.2.1. Décomposition	157
2.2.2. Allocation de capacité	157
2.2.3. Logique d'allocation de capacité en simulation	159
2.2.4. Exemple d'illustration	160
3. CAS D'APPLICATIONS	166
3.1. APPLICATION 1 : <i>SYSTEME MULTI-PRODUIT A PHASES CYCLIQUES</i>	166
3.1.1. Configuration du système	166
3.1.2. Indicateurs de performance	167
3.1.3. Tests et résultats des simulations	170
3.1.4. Discussion	174
3.2. APPLICATION 2 : <i>SYSTEME A SEMI-CONDUCTEURS</i>	175
3.2.1. Configuration du système	175
3.2.2. Les indicateurs de performance	176
3.2.3. Résultats de simulation	178
3.2.4. Discussion	180
4. CONCLUSION	180
CONCLUSION GENERALE	185

BILAN _____	185
PERSPECTIVES _____	187
BIBLIOGRAPHIE _____	191
ANNEXE A : ESTIMATION DES TAUX DE RUPTURE ET DE BLOCAGE D'UN MODULE DE TRANSFORMATION _____	203
1. TAUX DE RUPTURE D'UN MODULE DE TRANSFORMATION _____	203
2. TAUX DE BLOCAGE D'UN MODULE DE TRANSFORMATION _____	204
ANNEXE B : ESTIMATION DU TAUX DE PERTE EN SURPLUS _____	205

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les systèmes de production actuels ne cessent de croître en complexité. Cette complexité résulte pour une large part des exigences du marché, de la concurrence, de la qualité ainsi que de la densité et de la diversité des produits qu'ils traitent. Un exemple typique d'un système complexe, couramment utilisé, dans l'industrie est celui des structures flexibles en job-shop. Ce sont des systèmes capables de s'adapter à une possible évolution de l'environnement. Ils présentent une diversité importante des flux de produits avec des séquences quelconques de production incluant des phases cycliques (opérations multiples d'un même flux sur une même ressource). L'objectif associé à ce type de systèmes est alors d'assurer un traitement le plus varié possible avec un maximum de productivité au moindre coût.

Souvent mal maîtrisés, ces systèmes continuent à poser d'énormes problèmes de conception, de modélisation et de pilotage. Si par le passé l'expérience était suffisante pour concevoir et piloter un système de production, actuellement des techniques d'optimisation, des méthodes de dimensionnement et des politiques de pilotage sont souvent exigées. La maîtrise et l'optimisation des flux d'un système complexe nécessitent la mise à disposition d'un modèle « fin » de son comportement dynamique. Néanmoins, un dilemme subsiste entre l'élaboration d'un modèle trop simpliste autorisant une analyse aisée mais éloignée de son comportement réel, et un modèle plus proche de la réalité mais dont l'étude est trop complexe, voire impossible.

Dans ce contexte, la simulation est sans doute l'une des techniques les plus répandues pour l'analyse des flux dans les systèmes de production ainsi que pour la conception d'une politique de pilotage adéquate. C'est un outil puissant en raison de sa flexibilité et de sa capacité à représenter pratiquement n'importe quel système. Cependant, cette flexibilité a sa contrepartie dans les coûts des calculs et de programmation : les simulateurs requièrent d'importantes ressources en termes de temps d'exécution et d'espace de stockage. De plus, la validation d'un simulateur est souvent une tâche difficile à réaliser en raison de son incapacité à modéliser des décisions. Autrement dit, le système de pilotage associé au système de production simulé est rarement intégré.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à l'étude, par simulation, des flux de production de systèmes à haute cadence afin d'identifier des aspects importants de leur comportement pour pouvoir proposer des stratégies de pilotage adéquate. En effet, certaines industries de papier, de l'agro-alimentaire ou encore des semi-conducteurs produisent quotidiennement des quantités importantes. Dans ces industries, sur un horizon de six mois à un an, le flux des produits peut être facilement considéré comme continu. Ainsi, nous pouvons considérer que les unités de production n'émettent pas des produits individuels mais un fluide continu décrit par son débit instantané. Dans ce cas, l'utilisation de modèles dits « fluides » ou « continus » s'avère pertinent d'un point de vue macroscopique [Pierreval et al., 2007].

Dans un premier temps, les apports des modèles continus en simulation sont illustrés. Bien que de nombreuses études analytiques sur ces modèles existent, il y a à notre connaissance très peu de travaux dédiés à la simulation contrôlée à travers ces modèles, et plus particulièrement à la simulation fluide des flux de production.

Dans un second temps, en s'appuyant sur ces modèles, la conception d'un système de pilotage est abordée en vue de proposer des politiques de régulation des flux permettant de diminuer

les phénomènes de ruptures et de blocages, conséquences de la propagation d'aléas de fonctionnement (pannes). De notre point de vue, une politique distribuée d'allocation de capacité de production constitue une approche possible pour répondre à ce besoin. Ce prérequis n'est cependant pas suffisant dans la mesure où une distribution stricte génère également des faiblesses liées en particulier à la capacité d'anticiper les perturbations et de satisfaire les objectifs globaux (vision locale). Pour pallier cette lacune, une décomposition hiérarchique du système de pilotage en deux niveaux est alors adoptée : un niveau bas de « commande locale » distribué et un niveau haut de « supervision ».

Le premier niveau de cette hiérarchie est composé d'un ensemble de contrôleurs locaux directement liés au système physique. Chaque contrôleur local est chargé de piloter un module de production élémentaire constitué de l'unité de production principale (machine) et de ses stocks voisins. A ce niveau, il s'agit de suivre de plus près la production afin de satisfaire la demande au moindre coût. Sous l'angle du « contrôle-commande », cela revient à résoudre un problème de suivi de trajectoire bien connu en automatique continue. L'erreur de poursuite dans ce cas est exprimée par la notion de surplus qui traduit la différence entre la production et la demande cumulées [Kimemia and Gershwin, 1983 ; Gershwin, 2000].

Dans les approches conventionnelles de pilotage à base de surplus, la recherche de la commande se décline sous la forme d'un problème d'optimisation en programmation dynamique pour fixer les taux de production qui minimisent les coûts de rupture et de blocage. Si la solution optimale pour le cas simple à une machine est bien établie [Akella and Kumar, 1986 ; Bielecki and Kumar, 1988], la résolution des cas multi-machines et multi-produits reste difficile [Srivatsan, 1993 ; Perkins and Srikant, 1997]. De plus, la présence de phénomènes incertains tels que les pannes complique le problème. Partant de ce constat et étant donné le grand nombre de paramètres à considérer dans le contrôle et le besoin en réactivité, nous avons opté pour l'usage de techniques issues de l'intelligence artificielle. Ainsi, une démarche de synthèse de la commande locale est décrite sur la base des systèmes flous de Sugeno à conclusions numériques [Takagi and Sugeno, 1985 ; Sugeno, 1999].

Au second niveau du pilotage, la problématique est posée sous l'angle de la supervision. En effet, la vision locale du pilotage « bas niveau » ne peut garantir la satisfaction des objectifs globaux. Ces objectifs sont souvent évalués par des indicateurs de performance qui peuvent présenter, dans bien des cas, des aspects antagonistes. Ainsi, nos préoccupations majeures à ce niveau, se situent dans le cadre d'aide à la décision qui considère l'action de supervision non nécessairement guidée par une performance unique mais comme pouvant être une composante additive résultante d'un ensemble de performances en interaction. Nos propositions se déclinent en un ensemble de mécanismes de supervision qui se distinguent par le formalisme de représentation des objectifs, les méthodes d'agrégation employées et la nature des informations agrégées. Dans ce contexte, deux approches sont développées. La première consiste à décider, selon le mode de fonctionnement du système, des actions de supervision relatives à chaque performance globale, puis les agréger en fonction du degré d'éloignement par rapport aux objectifs désirés. La seconde démarche consiste quant à elle, à agréger les performances obtenues ainsi que les objectifs associés pour ensuite être comparés afin de décider de l'action de supervision. Dans les deux cas, l'action de supervision est appliquée sous forme d'une composante additive à la loi de commande locale.

En résumé, les problèmes majeurs abordés dans de ce travail sont :

- Quelle représentation faut-il adopter pour modéliser et simuler les flux de production dans un système de production à cadence élevée ?
- Comment synthétiser un système de pilotage permettant d'allier les aspects de régulation (commande bas niveau) et de décision en présence d'incertitudes sur l'environnement (fluctuation des demandes) et sur le système (fluctuation des flux de produits pour cause de pannes par exemple) ?
- Comment appréhender les concepts théoriques du pilotage et de la simulation proposés dans le contexte réel des systèmes complexes ?

Ainsi, l'originalité de ce travail réside dans l'application de méthodologies issues de l'automatique continue aux systèmes de production (traditionnellement classés dans la catégorie des systèmes à événements discrets) pour la synthèse d'un système de pilotage. Les points majeurs traités dans ce travail se présentent comme suit :

- Le premier point concerne la définition d'un cadre de modélisation et de simulation des flux de production. Pour ce faire, nous avons adopté un modèle continu en approximant l'évolution des flux sous forme d'un fluide sans introduire d'erreurs significatives. Cela permet de pallier aux problèmes d'explosion combinatoire inhérents au grand nombre de produits lorsqu'un modèle discret est utilisé.
- Le deuxième point fait référence à l'approche de pilotage proposée. Notre contribution à ce niveau consiste à proposer une politique d'allocation de capacité fondée d'une part, sur l'utilisation d'une commande floue pour réguler les flux de produits circulant dans le système. D'autre part, la proposition d'un ensemble de mécanismes de supervision fondés sur l'agrégation d'informations globales et locales afin de disposer d'un niveau de décision pour élaborer la commande de supervision.
- Le troisième point concerne le volet applicatif traitant des cas complexes multi-produits. Sur ce point, notre travail porte sur :
 - le déploiement de l'approche de commande et de supervision au cas multi-produit,
 - la validation de la faisabilité des mécanismes proposés sur des cas applicatifs.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, la problématique de la modélisation et de la simulation des flux dans les systèmes de production est rappelée. En particulier, ce chapitre porte sur la modélisation continue des flux de production. Le modèle exploité est orienté simulation continue dite « fluide ». Nous justifions alors notre choix et mentionnons ses avantages vis-à-vis des simulateurs conventionnels et ses faiblesses potentielles. Ce chapitre comporte une synthèse bibliographique sur notre contexte d'étude.
- Dans le deuxième chapitre, nous abordons la problématique du pilotage au niveau local. Ainsi, nous considérons pour chaque entité de production élémentaire une unité de commande locale. Il s'agit d'un contrôleur flou permettant de réguler les flux traversant le module de production élémentaire. Sur la base de l'état de l'art des différents travaux existants, nous détaillons la démarche de synthèse adoptée. Dans ce contexte, une politique d'allocation de capacité (taux de production de chaque machine) est alors

définie en s'appuyant sur la notion du surplus. Nous terminons ce chapitre par une illustration de la faisabilité de la loi de commande locale à travers un exemple.

- Dans le troisième chapitre, nous examinons la problématique de la supervision. Un premier mécanisme de supervision basé sur une agrégation par règles floues est décliné. Cette première approche est un point de départ pour décrire le mécanisme de décision dans la supervision. En effet, compte tenu des résultats obtenus avec cette démarche et les limitations constatées, nous proposons une deuxième approche de supervision basée sur des opérateurs d'agrégation. Dans ce cadre, deux mécanismes sont développés pour synthétiser la loi de supervision. Le premier est basé sur une représentation des objectifs par intervalles (conventionnels ou flous) et l'agrégation des actions élaborées pour chaque performance. Le deuxième mécanisme se base sur l'agrégation des objectifs et des performances en adoptant une représentation par intervalles flous pour élaborer la loi de supervision où l'accent est mis sur la gestion des situations conflictuelles.
- Dans le quatrième chapitre, nous traitons, par simulation, des cas d'application afin de valider la faisabilité des concepts proposés. Nous donnons tout d'abord une extension de notre approche aux systèmes multi-produits. Nous évaluons ensuite les performances de la démarche de pilotage en considérant deux exemples complexes. Le premier, traité dans la littérature, est un exemple de système de production job-shop produisant trois types de produits et invoquant des opérations de transformation, d'assemblage et de désassemblage avec des phases cycliques. Le second est un cas de l'industrie des semi-conducteurs, caractérisé par un flux de production élevé. A travers ces deux applications, les aspects concernant la robustesse aux aléas de l'environnement et la pertinence des indicateurs choisis sont évalués.

CHAPITRE 1

Modélisation et simulation des flux de production

Chapitre 1 :

Modélisation et simulation des flux de production

1. Introduction

Ce chapitre expose les concepts utilisés dans cette thèse pour présenter la méthodologie de modélisation et de simulation des flux dans un système de production. Les ressources principales rencontrées dans le contexte des systèmes de production, ainsi que leurs configurations logiques et physiques sont listées et définies. Nous mettons alors en évidence l'apport d'une modélisation continue ou « fluide » dans un système de production où une approximation continue des flux discrets est proposée et justifiée. Par la suite, après avoir présenté les éléments et les règles régissant la représentation des flux, nous abordons le volet de l'évaluation et de l'analyse des performances à l'aide de deux approches, à savoir les méthodes analytiques et la simulation. Une étude des propriétés de chaque méthode nous a permis de mettre l'accent sur son utilité et son intérêt, pour aboutir finalement à la justification de la technique adoptée dans ce travail, à savoir la simulation continue des flux de production.

Le lecteur remarquera que ce chapitre fait référence à de nombreuses notions d'analyse et de techniques de représentation et d'évaluation. Nous attirons son attention sur le fait que notre objectif n'est pas de détailler ces concepts déjà largement développés dans la littérature, mais uniquement de donner un rapide « descriptif » de la bibliographie associée aux méthodologies exploitées dans cette thèse. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter les différents articles cités en référence dans ce chapitre.

2. Les systèmes de production

Un système de production est généralement vu comme l'association d'un ensemble de ressources en interaction pour réaliser une activité de production. En effet, la production s'effectue par une succession d'opérations dites de transformation, de transfert, d'assemblage et de désassemblage en exploitant les ressources disponibles (machines, moyens de transfert, ...) afin de transformer les matières premières (composants entrant dans le système) en produits finis sortant de ce système.

Les systèmes de production peuvent être des systèmes très complexes et difficiles à gérer au vu de toutes leurs composantes fonctionnelles (fabrication, maintenance, gestion, pilotage, ...). Plusieurs approches ont été envisagées dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement et de mieux les appréhender.

D'un point de vue général, il est conventionnel de décomposer le système « entreprise » en trois systèmes coopérants [Le Moigne, 1990] (Cf. Figure 1.1.a) :

- Le système physique de fabrication,
- Le système d'information,
- Le système de décision.

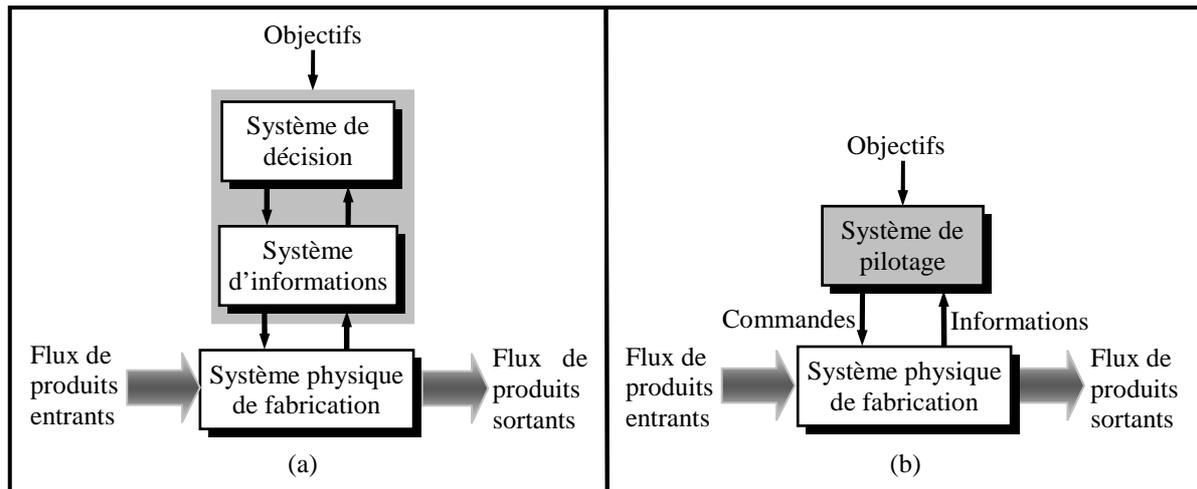


Figure 1.1 : Décomposition systémique : (a) système entreprise, (b) système de production.

Afin d'atteindre les objectifs et les performances planifiés pour une production, le système de décision contrôle le système physique de fabrication. Il coordonne et organise les activités en prenant des décisions basées sur les données transmises par le système d'informations. Ce dernier joue le rôle d'une passerelle entre le système physique et le système de décision. Autrement dit, le rôle du système d'informations est de collecter, stocker, traiter et transmettre les informations du système nécessaires à son évaluation et à son pilotage par le système de décision.

Si cette décomposition est valable pour le système « entreprise » et permet son analyse, elle est toutefois moins adaptée pour le système de production. En effet, dans un système de production, les sous-systèmes d'informations et de décision n'ont pas d'existence propre indépendamment l'un de l'autre. Ils constituent ensemble ce que nous appelons le système de pilotage [Habchi, 2001 ; Trentesaux, 2002]. Ainsi, il est plus conforme à la réalité de considérer le système de production comme l'association d'un système physique de fabrication et d'un système de pilotage (Cf. Figure 1.1.b).

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur l'étude du système physique de fabrication d'un point de vue classification, organisation, modélisation et évaluation. L'étude du système de pilotage quant à elle fera l'objet du Chapitre 2.

3. Classification des systèmes de production

D'une manière générale, classer des systèmes de production impose une réflexion sur leur organisation, leur typologie, leurs spécificités et donc leurs cas d'usage. Dans ce cadre, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait qu'il est maintenant très difficile d'établir une classification exhaustive de toutes les caractéristiques, publiées dans la littérature, concernant un système de production. Nous allons donc proposer un rapide survol sur des classifications qui dressent un bilan synthétique sur les aspects qui nous intéressent dans le cadre de cette étude.

Dans ce contexte, deux classifications des systèmes de production trouvées dans la littérature [Giard, 2003] permettent de situer précisément le contexte de notre travail : l'une selon la nature et le volume des flux physiques dans le système et l'autre selon le mode de pilotage.

3.1. Classification selon la nature et le volume des flux physiques

La première classification est fondée sur la nature du système physique et le volume des produits fabriqués par ce dernier. Dans ce cadre, on distingue principalement trois types de systèmes :

1. **Systèmes à flux continu (SFC) :** dans ces systèmes, la matière circule en flux continu, c'est-à-dire que l'attente entre deux ressources est exclue ou très limitée. Ce type de systèmes concerne surtout les industries dites de « process » dont la production nécessite la manipulation de matières liquides ou gazeuses.
2. **Systèmes à flux discret (SFD) :** dans ces systèmes, les produits peuvent être distingués individuellement (production discrète). De plus, des zones de stockage temporaire entre deux postes de travail sont utilisées. C'est le cas des entreprises manufacturières. C'est cette catégorie de systèmes qui nous intéresse dans notre étude où trois classes peuvent être distinguées :
 - les systèmes de production en grande série ou de masse : cette classe se caractérise par le lancement en production, dans les mêmes délais, de grands volumes de produits similaires. L'ordre de passage des produits sur les ressources (machines, stocks, etc.) étant toujours le même, celles-ci peuvent être placées dans un ordre figé dépendant du produit à fabriquer.
 - les systèmes de production en moyenne série ou par lots : contrairement à la classe précédente, il s'agit ici d'ateliers dans lesquels la diversité des produits ne permet pas une spécialisation des moyens de production. Les différents produits suivent leur propre chemin sur des ressources communes de flexibilité élevée souvent regroupées par fonctionnalités équivalentes.
 - les systèmes de production unitaire : pour ce type de systèmes, la taille du produit ou la demande impose une production de très faible quantité. Dans ce cas, la tâche principale de la production consiste à réunir les moyens nécessaires au bon moment et au bon endroit.
3. **Systèmes à flux hybride ou discontinu (SFH) :** ces systèmes se situent à mi-chemin entre les systèmes à flux continu (SFC) et les systèmes à flux discret (SFD). Deux configurations peuvent être distinguées :
 - les deux types de systèmes (continu et discret) sont couplés : la production est continue tout en ayant un conditionnement discret des produits.
 - les deux aspects continu et discret cohabitent : dans le même système de production, les traitements sont continus mais effectués par lots.

Dans certains cas, les deux configurations précédentes peuvent être associées. Pour une étude plus détaillée sur les systèmes hybrides (discontinus), le lecteur peut se référer par exemple à la thèse de Andreu [Andreu, 1996].

3.2. Classification selon le mode de pilotage

La deuxième classification des systèmes de production est étroitement liée à la stratégie de pilotage utilisée. En effet, en se situant au niveau opérationnel et sur la base du mode de déclenchement de la production, cette classification sépare les systèmes fonctionnant à flux tirés de ceux fonctionnant à flux poussés [Giard, 2003] :

- **Les systèmes à flux tirés** : dans ce contexte, la production est déclenchée par la consommation des produits finis. D'une manière générale, on peut distinguer deux types de fonctionnement. Le premier consiste à maintenir un stock minimum spécifié de produits finis. Dans ce cas, on parle d'une production sur stock (make to stock). Autrement dit, si un produit quitte le stock, un ordre de fabrication est lancé au système afin de pouvoir le reconstituer. Dans le deuxième type, la production est déclenchée par la réception d'une commande. En d'autres termes, ce type de fonctionnement vise à maintenir un stock de produits finis nul.
- **Les systèmes à flux poussés** : dans ce cadre, le déclenchement de la production est basé sur des planifications et des prévisions pour déterminer un programme de production. Dans ce type de gestion des flux, c'est la disponibilité du produit venant de l'amont qui déclenche l'étape suivante de fabrication. Cette méthode de production implique souvent le stockage des produits finis avant leur livraison.

Si d'un point de vue théorique cette classification reste pertinente, son déploiement dans la réalité industrielle est moins viable. En effet, dans la pratique, des systèmes de pilotage purement à flux tirés ou purement à flux poussés sont rares. Dans ce contexte, au niveau opérationnel, ces modes coexistent où un pilotage « hybride » à flux poussés et tirés est utilisé. Par exemple, dans un système de production, les produits simples sont fabriqués en flux poussés et les produits complexes sont assemblés en flux tirés.

3.3. Discussion

La classification des systèmes abordée dans cette partie est résumée sur la Figure 1.2.

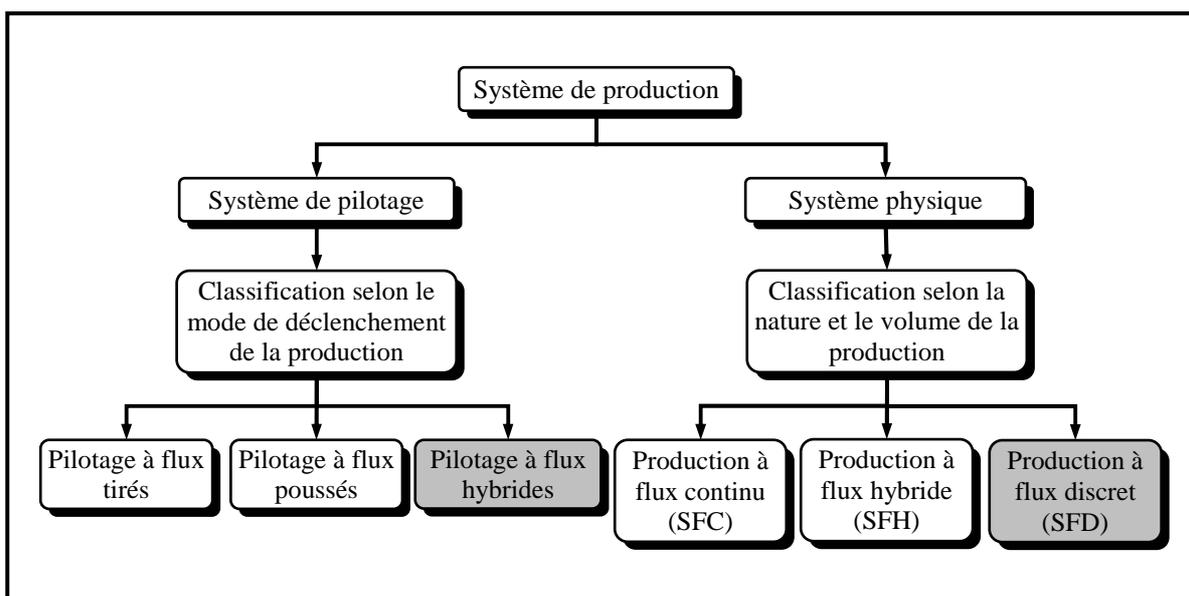


Figure 1.2 : Classification des systèmes de production selon [Giard, 2003].

Selon la première classification, nous nous intéressons à la production à flux discret et plus particulièrement à la production en moyenne et grande série. En effet, c'est dans cette catégorie de production que les problèmes de pilotage des flux et, plus particulièrement, d'allocation de capacité de production sont les plus nombreux et les plus complexes. De plus, la densité des flux de produits circulant dans ces systèmes nous permet de les approximer comme un fluide continu sans que cela introduise des erreurs significatives lors de l'évaluation des performances.

En fonction de la deuxième classification, nous nous situons dans le cadre d'un pilotage où les deux modes de gestion des flux poussés et tirés sont présents. La problématique de pilotage liée à cette classification fera l'objet du deuxième chapitre. Dans la suite, nous nous focalisons sur les systèmes de production à flux discret en détaillant leur organisation, leur modélisation et les outils nécessaires à leur analyse et leur évaluation.

4. Décomposition et organisation d'un système de production

Comme nous l'avons déjà discuté précédemment, nous nous situons dans le cas d'une production à flux discret. Dans ce contexte, afin de simplifier le problème de représentation et de pilotage des flux, nous allons nous intéresser à l'organisation physique des ressources et à leur agencement logique. L'objectif recherché est alors d'identifier les structures de base qui vont nous permettre de décomposer le système global en sous-systèmes élémentaires et plus simples à traiter.

Pour des raisons de simplicité et sans perte de généralité, les structures et les développements sont donnés pour un système de production mono-produit avec une seule opération par machine. Ces développements restent transposables pour des systèmes multi-produits avec plusieurs opérations par machine.

4.1. Organisation physique des ressources

L'organisation physique d'un système de production s'articule autour des ressources élémentaires (machines et stocks) qui correspondent au niveau le plus bas de la structure physique.

Un système physique de fabrication est alors vu comme un réseau de ressources élémentaires en interaction entre elles invoquant des processus de transformation, d'assemblage et/ou de désassemblage connectées par un chemin (une séquence) composé de machines et de stocks. En d'autres termes, un stock relie exactement deux machines : la machine amont et la machine aval, mais une machine peut relier deux ou plusieurs stocks (Cf. Figure 1.3).

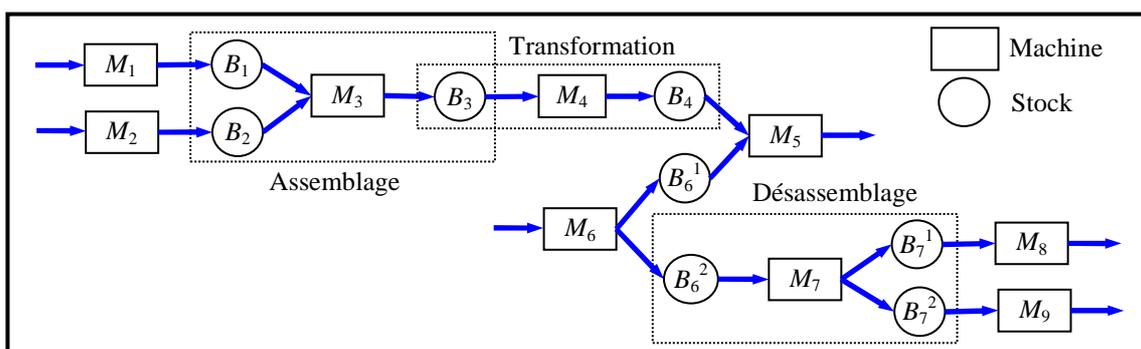


Figure 1.3 : Structures de base d'un système de production.

Selon la disposition des ressources et la nature des processus de fabrication, il est possible de dégager un certain nombre de configurations pouvant servir comme éléments de base pour décomposer les systèmes complexes. En effet, d'un point de vue structurel, nous distinguons trois configurations de base conduisant à trois types de modules de production élémentaires [Tsourveloudis et al., 2000] :

- *Module de Transformation (MT)* : ce module est constitué d'une machine, d'un stock amont et d'un stock aval dans lequel est déposé le produit fini issu d'un processus de transformation (Cf. Figure 1.4.a).
- *Module d'Assemblage (MA)* : ce module est composé d'une machine d'assemblage, d'au moins deux stocks d'entrée (à partir desquels divers composants sont pris selon un facteur d'assemblage) et d'un stock de sortie dans lequel est déposé le produit fini issu du processus d'assemblage (Cf. Figure 1.4.b).
- *Module de Désassemblage (MD)* : ce module est constitué d'une machine de désassemblage, d'un stock en amont et d'au moins deux stocks en aval dans lesquels les composants issus du processus de désassemblage sont stockés (en quantité définie par le facteur de désassemblage de chaque stock) (Cf. Figure 1.4.c).

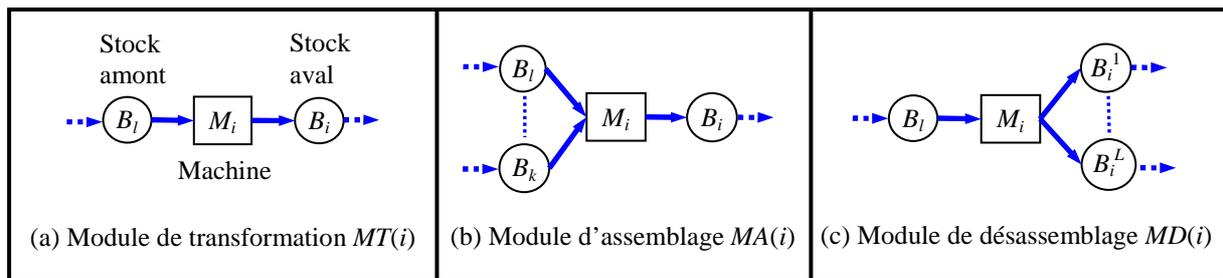


Figure 1.4 : Modules de production élémentaires.

En s'appuyant sur ces trois modules de base, un système physique de fabrication composé de N machines peut être décomposé en N modules de production élémentaires $MP(i)$, tel que $MP(i) \in \{MT(i), MA(i), MD(i)\}$. Chaque module de production $MP(i)$ est représenté par :

$$MP(i) = \{B_+(i), M_i, B_-(i)\}, i = 1, \dots, N.$$

avec :

- M_i : est la machine d'indice i .
- $B_+(i), B_-(i)$: sont respectivement, les ensembles des stocks d'entrée et de sortie de M_i .

Par exemple, un module de transformation $MT(i)$, d'assemblage $MA(i)$ et de désassemblage $MD(i)$ sont respectivement donnés comme suit :

$$MT(i) = \{B_l, M_i, B_i\}; MA(i) = \{\{B_l, \dots, B_k\}, M_i, B_i\}; MD(i) = \{B_l, M_i, \{B_i^1, \dots, B_i^L\}\}$$

L'interconnexion de ces différents modules permet de constituer diverses configurations d'un système de production à différents niveaux de complexité. Dans ce contexte, nous définissons un système de production SdP composé de N machines M_i ($i = 1, \dots, N$) séparées les unes des autres par des stocks à capacité finie par l'interconnexion d'un ensemble de N modules de production élémentaires $MP(i)$.

4.2. Organisation logique des ressources

La vue logique s'attache au traitement des processus de fabrication et fait partie intégrante de la vue interne du système de production [Trentesaux, 2002]. En effet, les ressources de base (machines, stocks, etc.) rencontrées dans le contexte des systèmes de production engendrent un certain nombre de configurations qui se distinguent par la nature des processus et des produits générés. Par analogie avec l'image des flux circulant dans le système, on peut identifier trois processus de base. Il s'agit [Ershler et Grabot, 2001 ; Campagne et Burlat, 2001] :

- D'un processus de transformation : qui consiste à transformer un produit de départ en un autre. Dans ce cas le flux est linéaire.
- D'un processus d'assemblage ou processus dit convergent : qui consiste à associer divers composants et matières afin de réaliser un produit fini. Dans ce cas, plusieurs flux linéaires se synchronisent au point d'assemblage en un seul flux, aussi linéaire.
- D'un processus de désassemblage ou processus dit divergent : qui, contrairement à un processus d'assemblage, permet d'obtenir simultanément divers produits par séparation d'un produit initial. Dans ce cas, à partir d'un flux linéaire, un éclatement au point de désassemblage donne plusieurs flux également linéaires.

Le déploiement de ces trois processus de base dans un système de production induit trois organisations logiques très largement étudiées dans la littérature.

4.2.1. Processus de transformation

Un processus de transformation est généralement présent sur des lignes de transformation. Ces dernières sont constituées par un ensemble de machines disposées en ligne et séparées par des stocks de capacité finie (Cf. Figure 1.5).

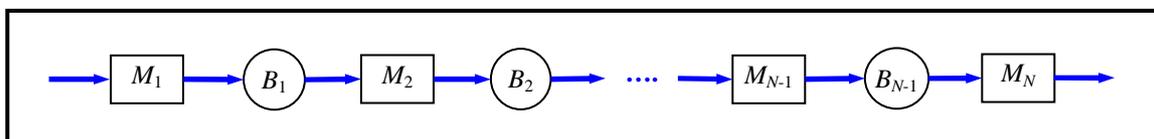


Figure 1.5 : Exemple d'une ligne de transformation.

Cette structure est donc composée exclusivement de modules de transformation (MT). Elle permet la fabrication d'un seul type de produit, ou une famille de produits analogues, en général en grandes séries (production de masse). Les stocks tampons entre deux machines successives sont un moyen d'absorber l'effet des aléas (retard d'approvisionnement, pannes, temps variables sur les machines, etc.). Le passage des produits par les ressources est linéaire (qualifié parfois « d'acyclique » [Perkins and Kumar, 1989]).

Dans ce contexte, on parle d'une ligne homogène lorsque toutes les machines la constituant ont le même temps opératoire (le même débit) et de ligne non-homogène dans le cas contraire. La ligne peut être synchrone si toutes les machines en état de fonctionnement commencent à travailler au même instant ou asynchrone dans le cas contraire. De plus, si toutes les machines ont les mêmes taux de défaillance/réparation et une capacité des stocks identique, la ligne est dite symétrique, sinon elle est asymétrique.

D'un point de vue conception, ces structures présentent deux problèmes majeurs. Le premier, qui est lié à la production de masse, concerne l'équilibrage de lignes. Dans ce cas, une des

démarches de conception proposée dans la littérature consiste [Dallery and Gershwin, 1992 ; Papadopoulos and Heavey, 1996 ; Dolgui et al., 2006] :

- Soit à affecter des opérations aux stations de travail de telle sorte que le nombre de stations soit minimal et que les contraintes de précédence et le temps de cycle de la ligne soient respectés.
- Soit à équilibrer la charge pour un nombre de stations fixe.

Le second problème réside dans le dimensionnement des stocks entre les machines [Papadopoulos and Vidalis, 1998], notamment dans les cas d'aléas et/ou de non équilibrage de la ligne [Papadopoulos and Vidalis, 2001 ; Gershwin and Schor, 2000].

4.2.2. Processus d'assemblage

Ce processus se caractérise par la présence d'au moins un module d'assemblage (une convergence des flux). Un processus d'assemblage nécessite au moins deux composants en entrée. Par exemple, sur la Figure 1.6 le produit C est assemblé à partir de A et de B . D'une manière générale, une machine d'assemblage (M_5 par exemple) est en situation de rupture si l'un de ses stocks en amont est vide.

Le problème principal dans cette structure réside dans la synchronisation de l'arrivée des composants pour l'assemblage [Baccelli et al., 1992]. A l'instar des lignes de transformation, le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage se pose également. Une revue récente qui donne un panorama des différentes méthodes d'équilibrage des lignes d'assemblage traitées dans la littérature est proposée dans [Becker and Scholl, 2006]. Une classification des différents types de problèmes d'équilibrage de ces lignes est également donnée dans [Boysen et al., 2007].

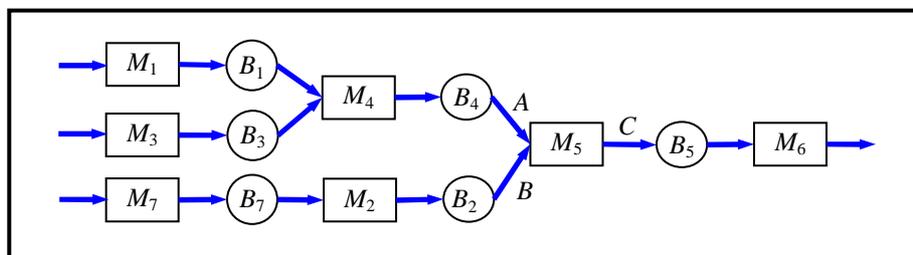


Figure 1.6 : Exemple d'une ligne d'assemblage.

4.2.3. Processus de désassemblage

Ce processus se caractérise par la présence d'au moins un module de désassemblage (une divergence des flux). Un processus de désassemblage fournit au moins deux composants à partir d'un seul produit. Par exemple, sur la Figure 1.7, le produit A est désassemblé en composants B et C . Un processus de désassemblage peut être bloqué si au moins un de ses stocks en aval est saturé. Les mêmes problèmes cités pour la ligne d'assemblage se posent également pour une ligne de désassemblage [Gungor and Gupta, 2002 ; Lambert, 2003].

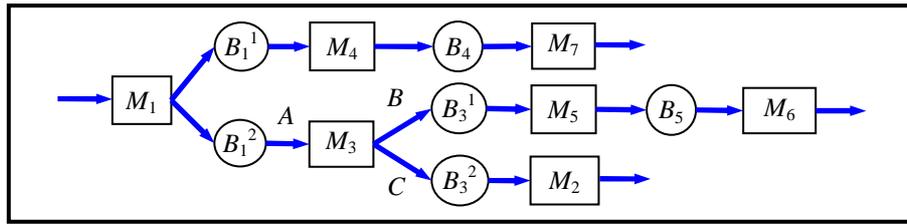


Figure 1.7 : Exemple d'une ligne de désassemblage.

4.2.4. Autres organisations logiques

D'une manière générale, selon le cheminement des flux à travers les ressources, le nombre des opérations traitées par les machines et leur ordre on distingue :

- **Les organisations à flots (flow-shop) :** une organisation de type flow-shop permet la fabrication de produits différents dans un ordre de visite unique. Certains produits peuvent ne pas passer par certaines machines.
- **Les organisation à tâches (job-shop) :** une organisation de type job-shop permet la fabrication de produits différents dans un ordre de passage quelconque avec possibilité de phases cycliques, *i.e.*, les produits peuvent passer par une machine plus d'une fois (flux réentrant [Bispo, 1997]).

Le schéma de la Figure 1.8 résume les concepts abordés dans cette partie et décrit le système de production à flux discret à travers ses deux facettes qui sont l'organisation physique et l'organisation logique.

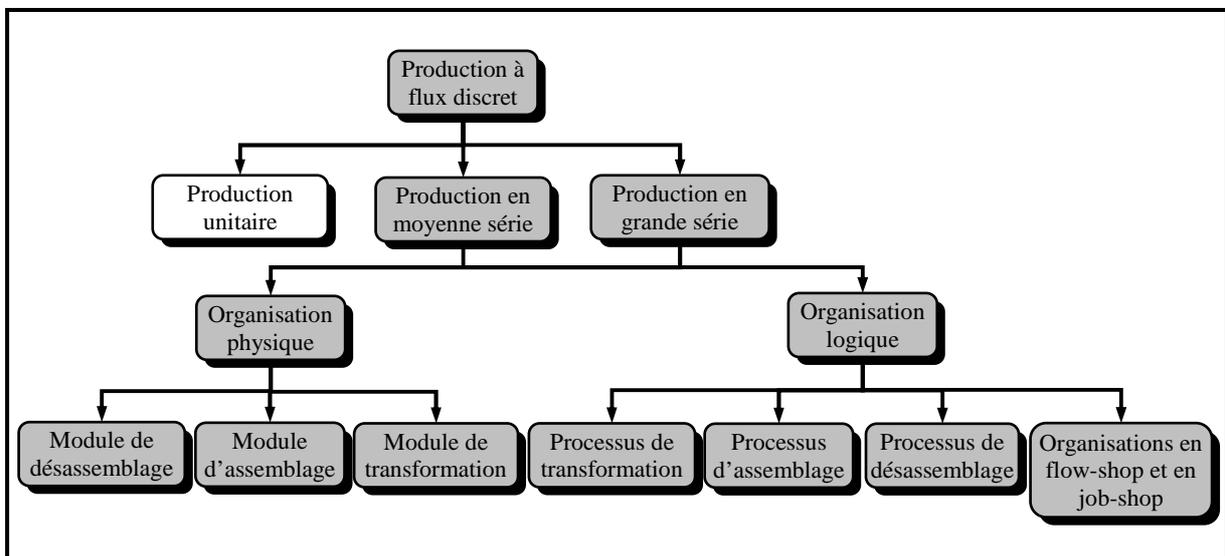


Figure 1.8 : Organisation et décomposition d'un système de production.

Après avoir décrit le système de production à flux discret d'un point de vue structurel, nous allons nous intéresser à l'obtention d'un modèle le représentant. Ce dernier est primordial pour l'analyse du comportement et des performances en simulation, ainsi que pour la synthèse de stratégies de pilotage.

5. Modélisation d'un système de production à flux discret

D'une manière générale, la modélisation d'un système de production est un problème complexe. Disposer d'un « bon » modèle pour un système donné apporte une aide indispensable aux concepteurs (systèmes en cours de conception) ainsi qu'aux utilisateurs finaux (systèmes en exploitation). Ce modèle va leur permettre, selon l'objectif visé, de faire de la simulation, de l'évaluation des performances, d'optimiser le fonctionnement et de tester différentes politiques et architectures de pilotage.

Dans la littérature, divers concepts (théories, méthodes, outils, modèles et langages) ont été proposés afin de maîtriser la complexité d'un système de production (nombre de paramètres, volume et variété des produits, dimension du système, etc.) et ainsi obtenir des modèles capables de refléter la dynamique de son fonctionnement.

Si théoriquement il est toujours possible de trouver un modèle capable de représenter la dynamique d'un système de production, en pratique cette représentation est souvent une tâche très difficile. En effet, la majorité des méthodes existantes sont restreintes à des classes particulières de systèmes. De plus, nombreuses sont les méthodes décrites dans la littérature qui, quoique bien formalisées mathématiquement, restent très difficiles à implanter pratiquement. Dans ce cadre, afin de faciliter l'étude des systèmes de production, de nombreuses hypothèses concernant la structure du système, sa dynamique et son environnement (les aléas pouvant survenir) sont souvent posées.

D'un point de vue pratique, il est important d'insister sur le fait qu'un modèle ne peut pas représenter de façon exacte le comportement d'un système réel. En effet, bien qu'il s'adapte à un aspect particulier du système, le modèle ne peut pas le représenter dans sa globalité. De ce fait, le choix de l'outil de modélisation ou de représentation doit dépendre des propriétés du système qu'on désire exhiber dans le modèle. Dans notre contexte, on s'intéresse aux problèmes de représentation et de modélisation d'un système de production à travers la dynamique des flux circulant dans ce dernier.

5.1. Systèmes et modèles

5.1.1. Système : définition

Nous donnons quelques définitions du « système » citées dans la littérature :

- « Un système est un objet complexe, formé de composants distincts reliés entre eux par un certain nombre de relations », Encyclopaedia Universalis.
- « An assemblage or combination of things or parts forming a complex or unitary whole », Webster's Dictionary.
- « A combination of components that act together to perform a function not possible with any of the individual parts », IEEE Standard Dictionary of Electronic Terms.

De ces définitions, le concept de « système » peut être caractérisé par :

- des « composants » en interaction,
- une « fonction » particulière qu'il est censé réaliser avec le respect d'un ensemble de contraintes.

Le terme « système » se réfère donc à un ensemble d'états (dont les valeurs évoluent au cours du temps) et aux interactions entre eux.

5.1.2. Modèle : définition

De la même manière, nous donnons quelques définitions de « modèle » citées dans la littérature :

- Pour Pavé [Pavé, 1994] : « Un modèle est une représentation symbolique de certains aspects d'un objet ou d'un phénomène du monde réel ».
- Pour Ferrier [Ferrier, 2003] : « Un modèle est une approximation, une vue partielle plus ou moins abstraite de la réalité afin d'appréhender plus simplement, selon un point de vue et il est établi pour un objectif donné ».
- Pour Fishwick [Fishwick, 1995] : « Modéliser c'est décrire la réalité sous la forme d'un système dynamique à l'aide d'un langage de description à un certain niveau d'abstraction ».

La première définition nous rappelle qu'un modèle représente le monde réel à l'aide d'une symbolique, c'est-à-dire d'un ensemble de signes. Dans la deuxième définition, un modèle est toujours subjectif puisqu'il est établi en fonction des objectifs, du jugement, de la nature et de la qualité des informations dont dispose le concepteur. La troisième définition introduit la notion de niveau d'abstraction ou de hiérarchie. Nous complétons ces définitions par celle de Minski [Minski, 1968], souvent citée dans les travaux de modélisation :

“To an observer B , an object A^* is a model of an object A to the extent that B can use A^* to answer questions that interest him about A ”.

Cette définition met l'accent sur le fait que le modèle doit permettre l'apprentissage du système modélisé. En effet, la construction d'un modèle est un processus d'apprentissage qui va nous permettre d'identifier les limites de notre connaissance sur le système.

En guise de conclusion sur ces définitions, on peut dire qu'un système dynamique est généralement représenté par un modèle exprimé dans un formalisme ou dans un langage qui permet de décrire l'évolution, au cours du temps, d'un ensemble d'objets en interaction [Willems, 1991] (Cf. Figure 1.9). Dans notre contexte, un système de production à flux discret est représenté par un modèle à flux discret exprimant les relations (interactions des flux) reliant les différentes entrées-sorties des modules de production élémentaires le composant.

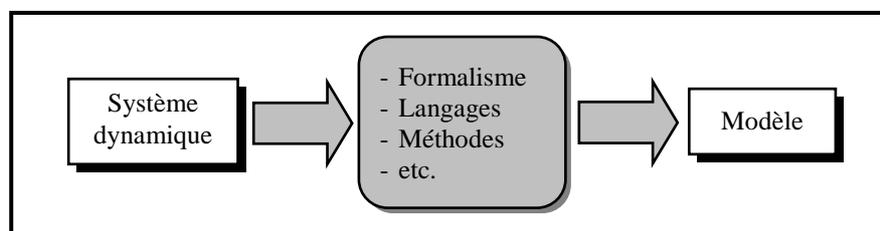


Figure 1.9 : Etapes de construction d'un modèle.

5.2. Représentation des SFD par modèles à événements discrets

Les systèmes à événements discrets (SED) recouvrent plusieurs domaines d'application dont les systèmes de production manufacturiers. Ils sont définis par :

- des espaces d'états discrets dans lesquels toutes les variables d'états prennent leurs valeurs dans un ensemble dénombrable,
- des évolutions nommées trajectoires, basées sur une succession d'états et de transitions [Cassandras and Lafortune, 1999].

Les modèles classiques de représentation de ces systèmes sont les automates à états finis [Hopcroft and Ullman, 1979], les réseaux de Petri (RdP), l'algèbre (max,+) [Murata, 1989 ; Baccelli et al., 1992] ou encore les réseaux de files d'attente [Papadopoulos et al., 1993 ; Baynat, 2000] (Cf. Figure 1.10).

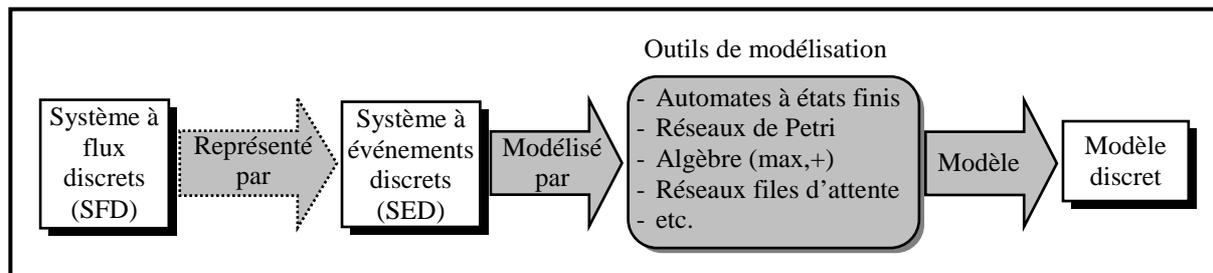


Figure 1.10 : Etapes de construction d'un modèle discret.

Cette vision du système est très fréquente dans l'industrie manufacturière où une installation est constituée de machines de production reliées par des zones de stockage et des moyens de transfert. Le produit est acheminé de machine en machine en subissant des transformations réalisées dans un temps fini. La transformation est interrompue dans le temps lorsque le produit est stocké entre deux opérations sur deux machines distinctes. L'évolution de l'état du produit est totalement dépendante des opérations qu'il subit et il reste invariant lors du stockage et du transfert. Dans ce cas, il est possible de localiser le produit dans l'espace et dans le temps. Cependant, cette localisation s'avère plus difficile dans les productions de masse en considérant le point de vue produit. Dans ce cas, l'usage de modèles purement discrets est vite limité.

Partant de cette constatation, nous considérons que le système de production à « gros volumes » n'émet pas des produits individuels mais un fluide continu de produits décrit par son débit instantané. Il s'agit alors d'approximer l'évolution du flux discret par un modèle fluide. Nous détaillons cela dans les paragraphes suivants.

5.3. Approximation des SFD par modèle continu (fluide)

Les caractéristiques des systèmes de production « gros volumes », lorsqu'ils sont considérés sur un horizon de six mois à un an par exemple, font que leurs entrées et sorties peuvent être facilement considérées comme continues. Dans ce cas, les flux de produits sont approximés par un modèle continu dit « fluide » [Suri and Fu, 1994 ; Kouikoglou and Phillis, 1997a]. Ce type de systèmes est souvent présent dans les industries du papier, de l'agro-alimentaire ou encore des semi-conducteurs où des quantités importantes de produits sont fabriquées quotidiennement.

L'idée de base de la modélisation fluide ou continue consiste à ne pas s'intéresser aux composantes individuelles du flux (les produits) mais à considérer que le système génère un fluide continu caractérisé par un débit instantané [Brandimarte et al., 1996]. Ces modèles consistent non pas à regarder le cheminement de chaque produit au sein du système (cas discret) mais plutôt à approcher leur évolution comme un fluide. Cela permet de pallier les

problèmes d'explosion combinatoire inhérents au grand nombre de produits lorsqu'un modèle discret est utilisé.

Les premiers développements et exploitations des modèles fluides ont été initiés dans le cadre des réseaux de télécommunication à haut débit (voir par exemple [Kulkarni, 1997]). Dans ce contexte, la démarche exploitée consiste à étudier les distributions stochastiques issues de la modélisation des centres de service par des réseaux de files d'attente.

Dans le cadre des systèmes de production, les modèles fluides ou à flux continu ont été exploités pour la première fois par Zimmern [Zimmern, 1956]. En se basant sur la théorie des systèmes, Zimmern propose une définition des variables d'état caractérisant la dynamique des flux dans une ligne de production sujette à des pannes. Dans [Filliger, 2005], afin de mettre en relation les problèmes de transport de produits circulant dans des installations de production par un modèle continu, l'auteur considère les phénomènes dynamiques propres au trafic routier comme analogue aux flux de production. Balduzzi et al. [Balduzzi et al., 2001] proposent une approche de modélisation et de simulation de systèmes manufacturiers complexes en combinant des réseaux de Petri hybride [Alla and David, 1998] avec une approximation par modèle fluide des flux de production. Dans [Xie, 2002 ; Fu and Xie, 2002], une étude à base d'un modèle à flux continu pour une ligne de production composée de deux machines séparées par un stock de capacité finie est proposée. Dans ce cas, les situations où les machines sont sujettes à des pannes dépendantes du temps [Xie, 2002] et des opérations [Fu and Xie, 2002] sont considérées. A chaque occurrence d'événement, un ensemble d'équations d'évolution des variables d'états (la production cumulée et le niveau des stocks) est établi. Dans ce contexte, les outils de modélisation de ces systèmes sont les équations différentielles ou les équations aux différences (Cf. Figure 1.11). Pour plus de détails sur l'utilisation des modèles fluides, en particulier dans le cas des lignes de transformation, le lecteur est invité à consulter l'état de l'art proposé par Dallery et Gershwin dans [Dallery and Gershwin, 1992].

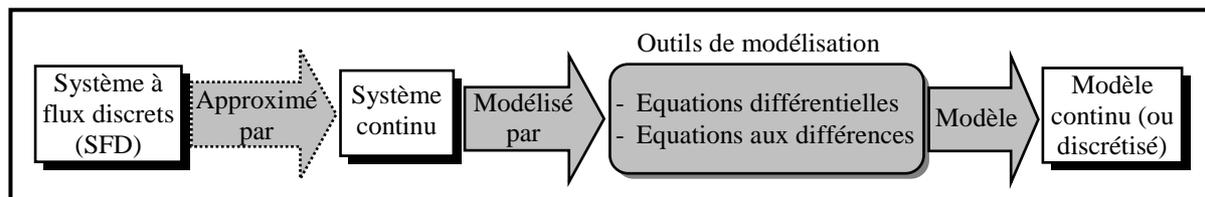


Figure 1.11 : Etapes de construction de modèle continu.

5.4. Discussion

La Figure 1.12 résume la classification des différents types de systèmes dynamiques d'après les définitions données ci-dessus. A noter que les systèmes hybrides constituent une troisième classe des systèmes dynamiques qui se situent à mi-chemin entre les systèmes continus et les systèmes à événements discrets (classe non abordée dans ce travail).

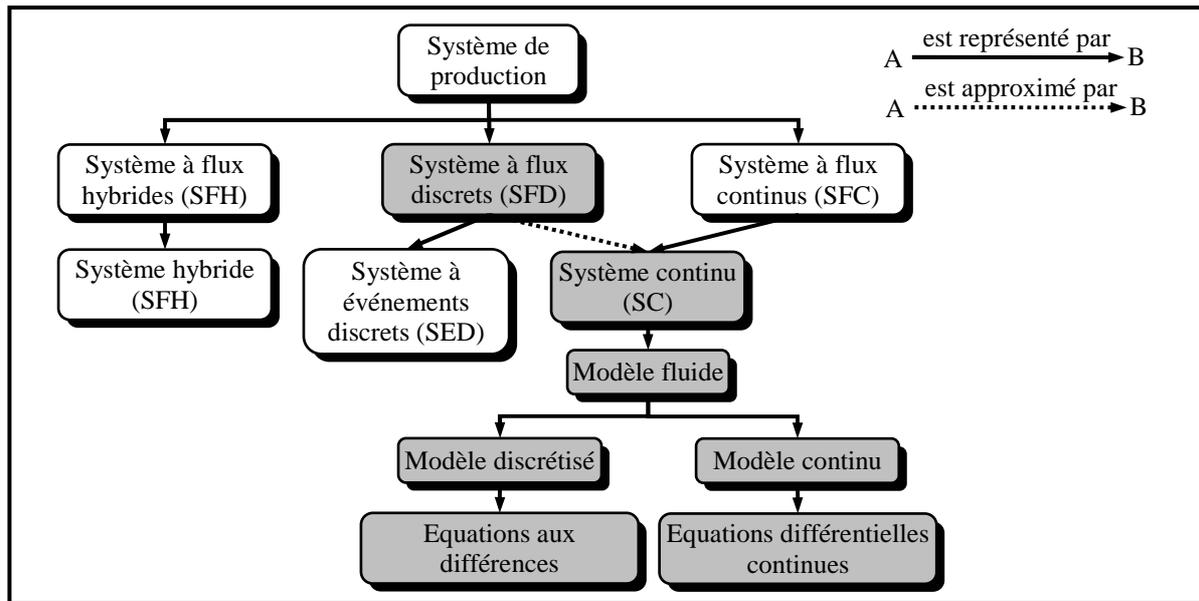


Figure 1.12 : Correspondance entre systèmes et modèles.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux systèmes à flux discret approximés par des modèles fluides ou continus. Le choix de ce formalisme est lié à la volonté de pouvoir exploiter un certain nombre de techniques de représentation issues de l'automatique conventionnelle. L'utilisation des modèles fluides est avant tout guidée par un souci d'efficacité mais elle est validée par d'intéressantes propriétés, résumées dans [Balduzzi et al., 2001] et citées comme suit :

- La modélisation fluide permet une augmentation considérable de l'efficacité du calcul. En effet, l'efficacité du calcul est liée à la possibilité de modéliser, via une approximation continue, la dynamique des flux sous forme de programme linéaire plus facile à résoudre. Par exemple, dans le modèle général de Sharifnia [Sharifnia, 1994] l'auteur a montré que le principal avantage de sa formulation est l'efficacité du code dans un problème de programmation linéaire afin de résoudre des systèmes à grandes dimensions. Balduzzi et Menga [Balduzzi and Menga, 1998] ont développé un modèle fluide afin d'optimiser la productivité en résolvant des problèmes de programmation linéaire. En particulier, ils ont montré, en exploitant la théorie d'approximation fluide, qu'un comportement du premier ordre peut être efficacement décrit par un formalisme algébrique linéaire. Bai et Gershwin [Bai and Gershwin, 1994, 1995] ont proposé d'approximer les paramètres du modèle à flux continu (capacités et niveaux des stocks) en résolvant des programmes linéaires sous contraintes.
- La modélisation fluide tient compte des contraintes de capacité des ressources du système manufacturier en considérant leurs taux de production. En conséquence, ces modèles offrent une meilleure estimation de la production du système considéré (voir par exemple les résultats expérimentaux dans [Suri and Fu, 1994]).
- La modélisation fluide offre une simplicité dans la synthèse d'une stratégie de contrôle optimale qui ne peut être obtenue par une modélisation discrète [Kimemia and Gershwin, 1983 ; Akella and Kumar, 1986 ; Bielecki and Kumar, 1988 ; Gershwin, 2000].
- Le modèle fluide fournit une formulation agrégée permettant de réduire considérablement la taille de l'espace d'état [Balduzzi and Menga, 1998 ; Balduzzi et al., 2000]. En effet,

l'aspect agrégé de la formulation par modèle fluide est lié à sa vision macroscopique du système. Cette vision consiste à limiter le nombre d'événements à observer et par conséquent la dimension de l'espace d'état. Dans [Balduzzi and Menga, 1998 ; Balduzzi et al., 2000], les auteurs définissent des macro-événements et des macro-états avec un haut niveau d'abstraction dans le modèle à événements discrets. Kouikoglou et Phillis [Kouikoglou and Phillis, 1997a] énumèrent les principaux événements observés liés aux stocks et aux machines dans le modèle de simulation à flux continu. Dans ce cadre, ils approximent les transitions d'états par des fonctions linéaires. De plus, il a été montré que ces approximations n'introduisent pas des erreurs significatives lors de l'analyse des performances en production [Suri and Fu, 1994 ; Kouikoglou and Phillis, 1997a].

- Dans un modèle fluide, les paramètres du système sont continus (capacités et niveaux des stocks par exemple), ce qui peut être utile dans des phases d'optimisation et d'analyse de sensibilité du système en considérant par exemple l'information du gradient [Xie, 2002 ; Fu and Xie, 2002]. A titre d'exemple, le modèle proposé dans [Balduzzi and Menga, 1998] permet de définir une variable d'état du système global afin d'évaluer les indices de performance et leurs gradients par rapport aux paramètres du système. Une autre étude intéressante est proposée dans [Yu and Cassandras, 2004] où les auteurs adoptent une approximation par modèle stochastique fluide (Stochastic Fluid Models SFM) combiné avec l'analyse de perturbations infinitésimales (IPA) [Cassandras et Lafortune, 1999] pour optimiser les coûts en production et en surplus des stocks.

5.5. Modèle à flux continu dit « fluide »

Dans cette partie, nous allons décrire le modèle fluide des flux et développer les équations qui régissent son comportement dynamique. Les notations et les définitions utilisées dans ce chapitre sont inspirées de celles proposées par Gershwin dans [Gershwin, 2000].

Dans un premier temps, pour des raisons de simplicité, le formalisme et les développements sont énoncés et illustrés sur un cas mono-produit avec une seule opération par machine, puis une généralisation aux systèmes multi-produits est donnée ultérieurement.

5.5.1. Cas mono-produit et mono-opération par machine

Les notations suivantes sont utilisées :

- $u_i(t)$: taux de production de la machine M_i (produit par unité de temps).
- τ_i : temps de traitement de la machine M_i (exprimé par unité de temps).
- λ_i : taux de panne de la machine M_i (panne par unité de temps).
- μ_i : taux de réparation de la machine M_i (réparation par unité de temps).
- $x_i(t)$: niveau du stock intermédiaire de la machine M_i (produit).
- $y_i(t)$: production cumulée de la machine M_i (produit).

A. Modèle dynamique des flux

Nous avons supposé que le flux de matière dans le système peut être représenté par un modèle continu dit « fluide ». Dans ce cas, toutes les variables qui seront exploitées dans le modèle seront définies dans l'espace des réels et prennent des valeurs dans des intervalles définis.

Sachant qu'un système de production est vu comme l'association de plusieurs modules de production élémentaires selon un schéma d'interconnexion, sa dynamique est alors définie par les interactions (connexions) entre ces derniers.

Il est clair que quelle que soit la structure d'un module de production MP (transformation, assemblage et désassemblage), l'information prépondérante est la dynamique des flux qui le traverse (Cf. Figure 1.13).

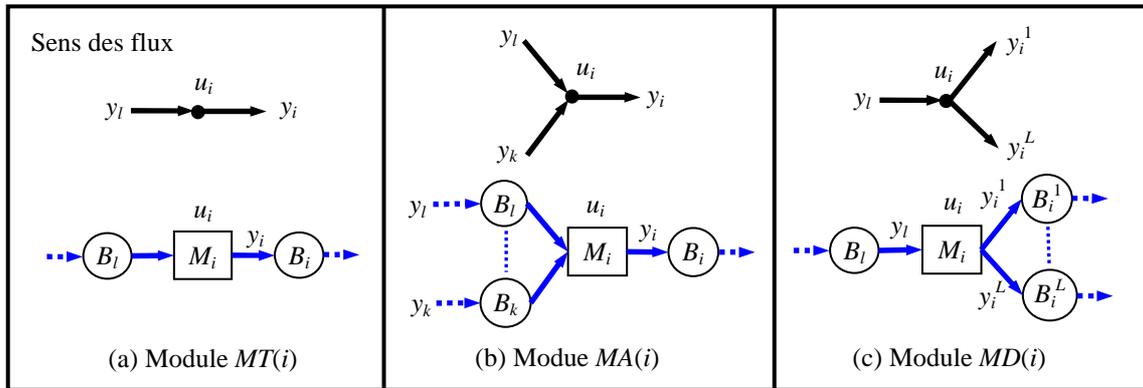


Figure 1.13 : Représentation de la dynamique des flux.

En effet, si on considère le module de transformation $MT(i)$ sur la Figure 1.13.a, pris en isolation, le flux issu du stock d'entrée B_l est traité par la machine M_i avec un taux de production u_i pour être ensuite accumulé en sortie dans le stock B_i . Le même principe est utilisé pour les modules d'assemblage et de désassemblage.

Dans ce cas, la production cumulée à la sortie de la machine M_i durant l'intervalle $[0, t]$ est donnée par :

$$y_i(t) = \int_0^t u_i(v) dv \tag{1.1}$$

Considérons maintenant le cas d'un système de production mono-produit constitué de N machines M_i et M stocks. Selon notre mécanisme de décomposition, ce système peut se décliner en N modules de production élémentaires $MP(i)$. La sortie de chaque module est donnée par l'équation (1.1) qui représente la quantité de produits fabriqués au niveau de ce module.

Se pose maintenant le problème de circulation des flux (les produits) dans le système selon l'interconnexion des modules de production. Dans ce contexte, selon l'état des machines (opérationnelles ou en pannes), la dynamique des flux est donnée par l'évolution des stocks d'interconnexion entre les différents modules (les stocks communs aux modules adjacents). Ces derniers définissent les stocks intermédiaires dont la capacité est supposée finie.

Pour des raisons de clarté, dans la suite de ce chapitre, le cas particulier d'une ligne de transformation à N machines est considéré (N module de production). Dans ce cas, le nombre maximal de stocks intermédiaires est égal à $(N-1)$. Soit B_i le stock intermédiaire (d'encours) situé entre les deux machines M_i et M_j (Cf. Figure 1.14). Son niveau est donné par l'expression suivante :

$$y_i(t) - y_j(t) = \int_0^t [u_i(v) - u_j(v)] dv \tag{1.2}$$

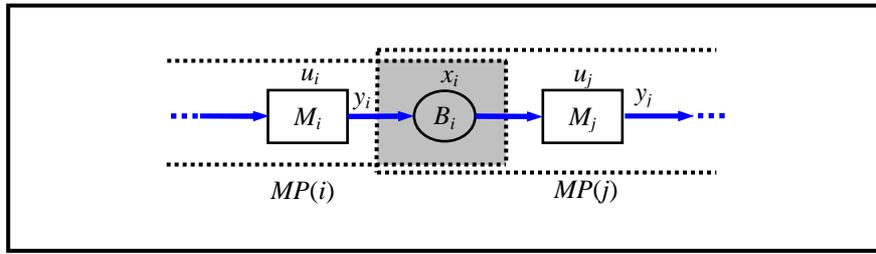


Figure 1.14 : Interconnexion entre deux modules de productions élémentaires.

Si on pose : $y_i(t) - y_j(t) = x_i(t)$ comme une variable d'état du système, alors la dynamique du stock intermédiaire B_i est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) - u_j(t) \quad (1.3)$$

Dans ce cas, la dynamique complète du système est décrite par un ensemble de $(N-1)$ équations différentielles sous la forme (1.3) exprimant l'évolution des flux traversant chaque module de transformation de la ligne. La sortie du système global est donnée par la production finie cumulée dans le stock final de sortie.

Sous forme mathématique, si on note M_N la machine de sortie du système fonctionnant avec un taux de production u_N , le modèle des flux peut s'exprimer par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = B \cdot \mathbf{u}(t) \\ y_N(t) = \int_0^t u_N(v) dv \end{cases} \quad (1.4)$$

où : $\mathbf{x} = [x_1(t), \dots, x_{N-1}(t)]^T \in \mathbb{R}^{N-1}$, $\mathbf{u} = [u_1(t), \dots, u_N(t)]^T \in \mathbb{R}^N$, B est une matrice d'ordre $(N-1) \times N$.

Cette formalisation reste valable pour les cas d'assemblage et de désassemblage. Toutefois dans le cas d'un désassemblage (Cf. Figure 1.13.c), les niveaux des stocks de sorties B_i^l , $l = 1, \dots, L$ de la machine M_i sont représentés par les variables $x_i^l(t)$.

B. Contraintes et perturbations sur le modèle

• Etat de fonctionnement de la machine

Dans ce modèle, nous avons supposé que le système est dans un état de fonctionnement normal (absence de pannes sur les machines). Dans la réalité, les machines sont sujettes à des pannes aléatoires supposées ici dépendantes des opérations, *i.e.*, une panne ne peut survenir que pendant la période de production de la machine. L'état de la machine M_i à l'instant t est alors défini par une variable binaire $\alpha_i(t)$ telle que : $\alpha_i(t) = 0$ si la machine M_i est en panne, et $\alpha_i(t) = 1$ si elle est opérationnelle. Dans cette thèse, nous supposons des taux de panne et de réparation suivant des distributions exponentielles avec des moyennes respectivement $1/\lambda_i$ et $1/\mu_i$. Autrement dit, l'état de la machine évolue suivant un processus Markovien à temps continu décrit par le diagramme d'état de la Figure 1.15.

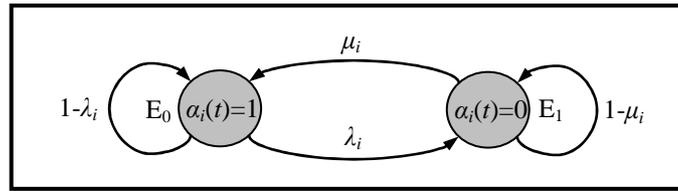


Figure 1.15 : Diagramme de transition de $\alpha_i(t)$.

Dans l'intervalle $[t, t+dt]$, les probabilités pour qu'une machine soit dans un état déterminé peuvent s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{\alpha_i(t+dt) = 1 | \alpha_i(t) = 0\} &= \mu_i \cdot dt \\ \text{Prob}\{\alpha_i(t+dt) = 0 | \alpha_i(t) = 1\} &= \lambda_i \cdot dt \\ \text{Prob}\{\alpha_i(t+dt) = 0 | \alpha_i(t) = 0\} &= 1 - \mu_i \cdot dt \\ \text{Prob}\{\alpha_i(t+dt) = 1 | \alpha_i(t) = 1\} &= 1 - \lambda_i \cdot dt \end{aligned}$$

Le temps moyen durant lequel la machine M_i est alternativement dans l'état opérationnel puis en état de panne, couramment appelé *Mean Time Between Failure MTBF*, est donné par $T_i = 1/\lambda_i + 1/\mu_i$ (Cf. Figure 1.16).

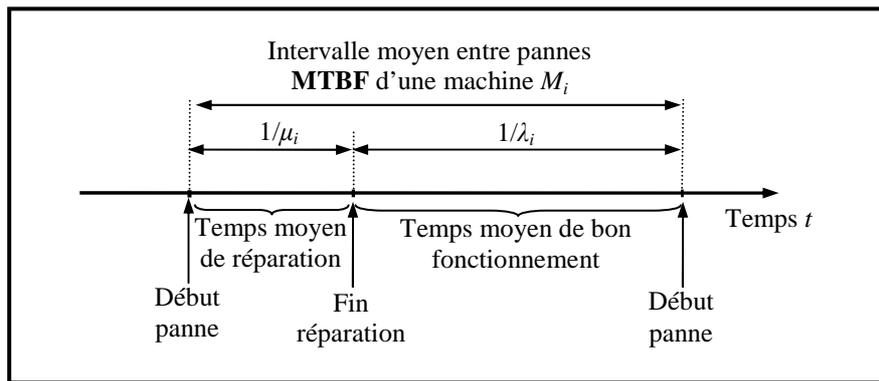


Figure 1.16 : Temps de cycle moyen d'une panne pour une machine M_i .

L'influence des paramètres $\alpha_i(t)$ sur le modèle peut être vue comme un vecteur de perturbation noté $\alpha(t) = [\alpha_1(t), \dots, \alpha_N(t)]^T$.

• **Capacité maximale d'un stock**

Sachant que les stocks intermédiaires (d'encours) ont une capacité finie, l'évolution d'une variable d'état $x_i(t)$ est contrainte par la capacité maximale de son stock x_i^{\max} .

Soit :

$$0 \leq x_i(t) \leq x_i^{\max}, i = 1, \dots, N - 1. \tag{1.5}$$

En fonction des taux de production des machines amont M_i et aval M_j , les valeurs limites de la contrainte (1.5) relative à un stock intermédiaire B_i correspondent aux états suivants :

$$\begin{cases} x_i(t) = 0 & , \text{si } u_i(t) < u_j(t) \\ x_i(t) = x_i^{\max} & , \text{si } u_i(t) > u_j(t) \end{cases} \tag{1.6}$$

Autrement dit, le stock intermédiaire tend à se vider si la cadence de la machine aval est supérieure à celle de la machine en amont. Dans le cas contraire, le stock tend à se saturer. Les deux cas conduisent à des situations de rupture et de blocage qui sont indésirables.

- **Taux de production maximum**

De la même manière, le taux de production instantané $u_i(t)$ de chaque machine M_i doit évoluer dans son domaine de validité. Autrement dit, il doit satisfaire la contrainte de capacité de la machine M_i exprimée par son taux de production maximum u_i^{\max} donné par :

$$u_i^{\max} = \frac{1}{\tau_i} \quad (1.7)$$

Soit alors :

$$0 \leq u_i(t) \leq u_i^{\max} \Leftrightarrow 0 \leq \tau_i u_i(t) \leq 1, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1.8)$$

Cette contrainte signifie que chaque machine M_i ayant une capacité de 1 ne peut fonctionner plus de 100% de son temps. Selon l'état de la machine (en fonctionnement normal ou en panne), on peut écrire :

$$\begin{cases} \text{Si } \alpha_i(t) = 0, & \text{alors } u_i(t) = 0 \\ \text{Si } \alpha_i(t) = 1, & \text{alors } 0 \leq u_i(t) \leq u_i^{\max} \end{cases} \quad (1.9)$$

Dans ce cas, en fonction du vecteur des pannes $\alpha(t)$, à chaque instant t la capacité du système global est alors donné par l'ensemble $\Omega(\alpha(t))$:

$$\Omega(\alpha(t)) = \left\{ u(t) \mid 0 \leq u_i(t) \leq \alpha_i(t) u_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N \right\} \quad (1.10)$$

5.5.2. Exemple d'illustration

Afin d'illustrer les concepts de modélisation détaillés dans les paragraphes précédents, un exemple représentant un système « mono-produit » donné par la Figure 1.17 est considéré. Ce système est composé de 4 machines M_i . Chacune travaillant avec un taux de production u_i . Le système se décompose alors en 4 modules de production (transformation) $MP(i)$ et 3 stocks intermédiaires comme illustré sur la Figure 1.17.

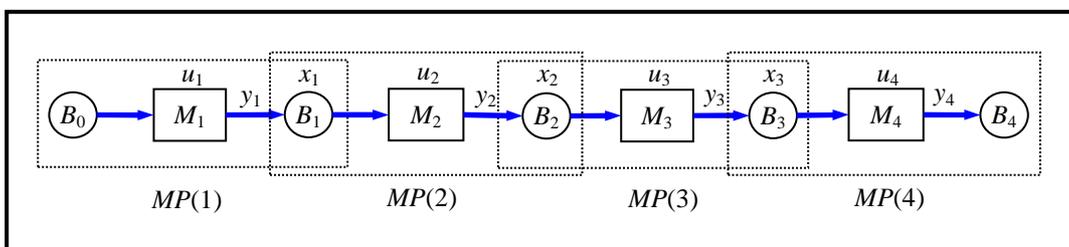


Figure 1.17 : Ligne de transformation mono-produit.

Le modèle de flux décrivant ce système est donné par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = u_1(t) - u_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = u_2(t) - u_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = u_3(t) - u_4(t), \\ y_4(t) = \int_0^t u_4(v) dv, \end{cases}$$

Sous forme matricielle, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} = B \cdot u(t) \\ y_4(t) = \int_0^t u_4(v) dv \end{cases}$$

où :

- $x_i(t)$ représente le niveau du stock intermédiaire B_i , $i = 1, 2, 3$.
- $u_i(t)$ représente le taux de production instantané de la machine M_i , $i = 1, \dots, 4$.
- $y_4(t)$ donne la production finie cumulée en sortie de la machine exécutant la dernière opération de la gamme (machine M_4).

5.5.3. Cas mono-produit et multi-opération par machine

Considérons maintenant un système de production mono-produit avec la possibilité de traitement de plusieurs opérations sur la même machine. Ce type de système correspond à une structure en job-shop avec des séquences de production cycliques. Dans ce cas, afin de pouvoir distinguer le type et l'ordre des opérations, nous supposons que les stocks sont homogènes. Autrement dit, un stock est défini à la fin de chaque opération sur une machine en introduisant l'indice de l'opération k ($k = 1, \dots, K$) dans la notation des stocks. Ainsi, selon le type de l'opération exécutée sur la machine, on distingue les situations suivantes :

- Si k est une opération d'assemblage ou de transformation, alors le stock intermédiaire situé en sortie de la machine M_i est noté par $B_{i,k}$.
- Si k est une opération de désassemblage, les L stocks de sortie de la machine de désassemblage M_i sont indexés par $B_{i,k}^l$, avec $l = 1, \dots, L$.
- Si la dernière opération de la gamme est une opération de transformation ou d'assemblage sur la machine M_i , *i.e.*, $k = K$, alors le stock de produits finis est noté $B_{i,K}$.
- Si la dernière opération de la gamme est une opération de désassemblage sur la machine M_i , alors les stocks des produits finis sont notés $B_{i,K}^l$, $l = 1, \dots, L$.

Cette notation nous permet de distinguer les différentes opérations sur la même machine. Cette configuration se présente dans le cas des systèmes à flux réentrant ou cyclique, très fréquente dans l'industrie des semi-conducteurs [Gershwin, 2000].

Dans ce cas, le formalisme du modèle d'état et de ses variables décrit précédemment reste valable avec les modifications suivantes :

- la variable d'état $x_i(t)$ est notée $x_{i,k}(t)$ où (i, k) fait référence à l'indice du stock intermédiaire $B_{i,k}$ en sortie de la machine M_i exécutant la $k^{\text{ième}}$ opération de la gamme.
- la variable d'entrée $u_i(t)$ est également notée $u_{i,k}(t)$ qui est le taux de production instantané de l'opération k sur la machine M_i .

Le modèle global des flux est de la même forme que (1.4). La différence majeure réside dans la possibilité d'existence d'un fonctionnement cyclique dans la séquence de production. Cette configuration nécessite une distribution de la capacité des machines selon les opérations exécutées.

5.5.4. Cas multi-produit, multi-operation par machine

Le formalisme décrit précédemment peut être généralisé au cas multi-produit. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir distinguer l'opération par type de produit traité sur chaque machine du système de production.

Dans le modèle, nous adoptons les notations suivantes :

- La variable d'état $x_i(t)$ est notée $x_{i,j,k}(t)$ où (i, j, k) fait référence à l'indice du stock intermédiaire $B_{i,j,k}$ de la machine M_i exécutant la $k^{\text{ième}}$ opération du produit de type j .
- La variable d'entrée $u_i(t)$ est également notée $u_{i,j,k}(t)$ correspondant au taux de production instantané de l'opération k du produit j sur la machine M_i .

Sachant que le système traite une variété de produits, la capacité d'une machine est distribuée selon le type de produit et l'ordre de l'opération exécutée. Ce point sera détaillé dans le Chapitre 4 où le cas multi-produit sera traité sur des exemples applicatifs.

Jusqu'à présent, nous avons évoqué les aspects liés à la modélisation des flux adoptés dans notre problématique. Comme toute représentation d'un système a pour objectif l'exploitation de ce dernier, nous abordons dans la partie suivante les aspects relatifs à l'analyse et à l'évaluation des performances à travers ce formalisme.

6. Analyse et évaluation des systèmes de production

La phase d'analyse et d'évaluation d'un système de production utilise habituellement des indicateurs de performance capables d'évaluer la pertinence du modèle utilisé par rapport au système de production.

On distingue classiquement deux grandes familles de méthodes pour l'analyse et l'évaluation des performances d'un système de production (Cf. Figure 1.18). La première repose sur l'exploitation des propriétés des modèles analytiques utilisés pour représenter le système. On entend par modèle analytique, toute description du système permettant une évaluation par une résolution, exacte ou approchée, par des méthodes mathématiques. Si, sous certaines hypothèses, ces méthodes peuvent donner les principales performances stationnaires du système, leur généralisation à des systèmes complexes qui font apparaître beaucoup de paramètres ou à des systèmes hétérogènes reste un problème difficile. De plus, la prise en compte des phénomènes aléatoires (défaillances des machines, etc.) demeure difficile à appréhender à travers un modèle purement analytique.

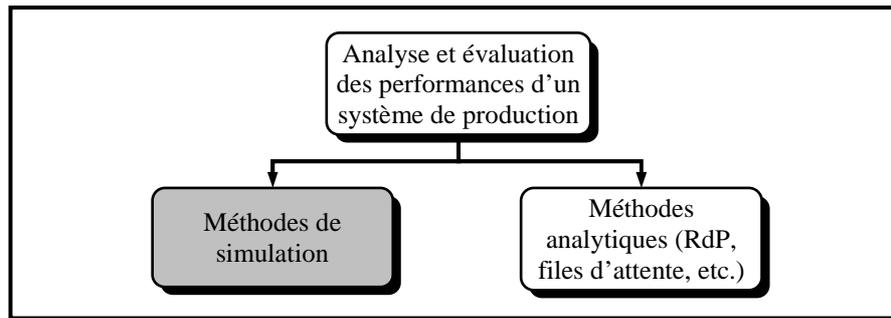


Figure 1.18 : Approches d'analyse et d'évaluation d'un système de production.

Une solution à ce problème peut être envisagée à partir de la deuxième famille des méthodes, à savoir les techniques de simulation. En effet, la simulation [Law and Kelton, 2000] est une approche naturelle qui consiste à exécuter, pas à pas, le modèle de représentation (souvent vu comme une description informatique) associé au système et à observer ensuite l'évolution des indicateurs de performance. Tous les détails peuvent être intégrés dans ce modèle de représentation. Il est clair que la simulation permet d'éviter la phase d'élaboration d'un modèle analytique complet, souvent difficile à obtenir, notamment pour des systèmes complexes soumis à des phénomènes aléatoires. Dans ce cadre, l'économie du modèle peut s'avérer importante tant en temps qu'en coût.

Toutefois, si la simulation apporte un gain considérable dans la phase de modélisation, aucune méthodologie de synthèse n'est réellement proposée. La validation des modèles de simulation est, en fait, traitée au cas par cas et reste difficilement généralisable à un système quelconque. De plus, cette flexibilité de la simulation a sa contrepartie dans les coûts de calcul et de programmation (les simulateurs requièrent d'importantes ressources en termes de temps d'exécution).

6.1. Analyse et évaluation par modèle analytique

La théorie des systèmes à événements discrets fournit un cadre mathématique bien maîtrisé pour analyser et évaluer des systèmes de production selon leur nature physique ou fonctionnelle. L'aspect le plus développé repose sur l'utilisation de modèles à base de chaînes de Markov [Buzacott and Shanthikumar, 1993], files d'attente [Baynat, 2000], Réseaux de Petri et algèbre Max+ [Baccelli et al., 1992].

Dans le contexte des flux de production, les principaux modèles rencontrés dans la littérature reposent souvent sur l'étude de chaînes de Markov [Buzacott and Shanthikumar, 1993]. Cependant, ces travaux se limitent à des systèmes simples mono-produits à deux machines non-fiables séparées par un stock de capacité finie [Dubois et al., 1982 ; Dallery et al., 1989 ; Buzacott and Shanthikumar, 1993]. Il a été prouvé qu'une généralisation au cas multi-produits [Perkins and Srikant, 1997] ou à des lignes de production à plus de deux machines est un problème difficile [Srivatsan, 1993]. Dans ce cadre, la première démarche scientifique qui vient à l'esprit consiste à s'appuyer sur le modèle analytique mono-produit d'une ligne à deux machines séparées par un stock et de l'étendre à une ligne à N machines. Malheureusement, cette démarche n'est pas viable compte tenu de la complexité du modèle chaîne de Markov obtenu. En effet, ce dernier est caractérisé par une énumération exhaustive de l'ensemble des états et des configurations du système dans un régime stationnaire (la complexité croît de façon exponentielle en fonction du nombre de machines) [Tolio et al., 2002].

Afin de remédier à ce problème de complexité, une alternative consiste à utiliser des méthodes analytiques approximatives. L'idée de base derrière ces méthodes est de ramener l'étude d'un système complexe, par des techniques de simplification et d'approximation, à l'étude d'un système simple équivalent composé de deux machines séparées par un stock ou à une combinaison de systèmes simples que l'on sait analyser. Dans ce contexte, les travaux développés pour l'analyse de lignes de production (ligne de transformation) sont certainement les plus nombreux [Dallery and Gershwin, 1992]. Ces lignes sont composées de machines (pouvant tomber en panne) séparées les unes des autres par des zones de stockage à capacité finies (ce qui peut induire des phénomènes de blocage et de famine). La complexité de ces systèmes porte sur le nombre de machines, de stocks intermédiaires et la multitude des paramètres à prendre en compte : temps opératoires, capacité des stocks, taux de défaillance et de réparation des machines. Cette analyse est souvent effectuée en absence de défaillances, puis généralisée en présence de défaillances [Cauffriez, 2005].

Dans la littérature, on distingue deux méthodes approximatives pour cerner la complexité de ces lignes : soit l'agrégation des entités du système en un seul système simple soit la décomposition du système global en des entités simples [Burman, 1995] (Cf. Figure 1.19).

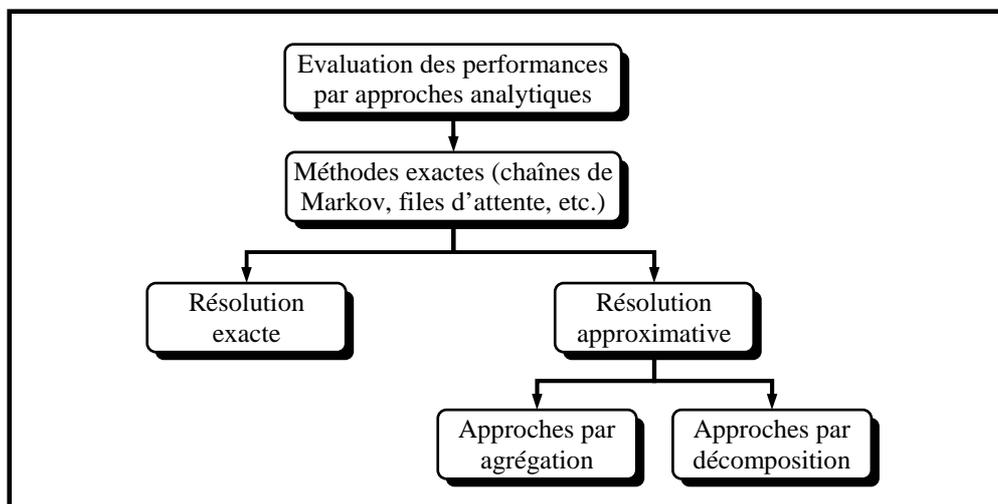


Figure 1.19 : Différentes approches analytiques d'évaluation de performances.

6.1.1. Les méthodes d'agrégation

Le principe de ces méthodes, illustré sur la Figure 1.20, repose sur un mécanisme d'agrégation itératif dont l'objectif est d'amener le modèle global d'une ligne de production à son équivalent composé de deux machines et un stock intermédiaire. A chaque itération, un groupe de deux machines séparées par un stock est agrégé en une seule machine équivalente. Par exemple, à la première itération le groupe de machines M_1 et M_2 avec leur stock intermédiaire B_1 est agrégé en une machine équivalente notée $M_{1,2}$ [Ancelin et Semery, 1987 ; Terracol and David, 1987 ; De Koster, 1987] (Cf. Figure 1.20).

Dans ce cas, la difficulté réside dans la détermination des paramètres de la machine équivalente (capacité maximale, taux de défaillance et taux de réparation). Ce mécanisme itératif se poursuit jusqu'à l'obtention d'un modèle agrégé composé de la machine équivalente, de la machine à l'extrémité de la ligne de production et du stock intermédiaire. Il est important d'attirer l'attention sur le fait que selon que l'agrégation commence par l'amont ou par l'aval de la ligne, on peut obtenir des modèles équivalents différents [Terracol and David, 1987].

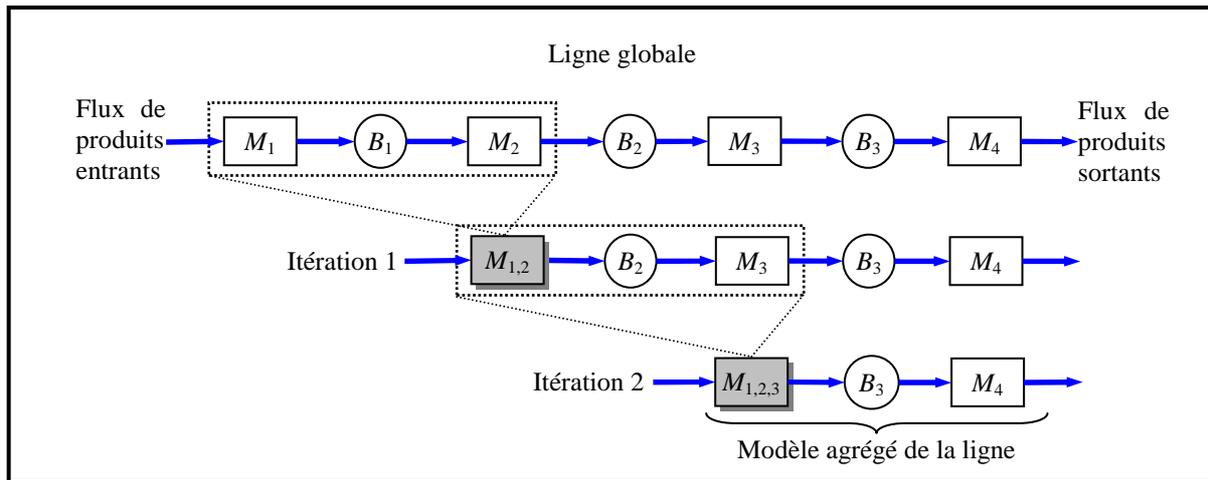


Figure 1.20 : Agrégation amont d'une ligne de production à quatre machines.

Le principal reproche qu'on peut faire à l'égard de ces méthodes est leur propagation mono-directionnelle des événements. En effet, la Figure 1.20 montre qu'il est impossible de répercuter les effets bloquants en aval sur les paramètres équivalents de la machine agrégée $M_{1,2}$ précédemment calculée. Ce constat a incité les chercheurs à délaisser ces méthodes au profit des méthodes par décomposition.

6.1.2. Les méthodes de décomposition

Contrairement aux méthodes d'agrégation, ces techniques reposent sur la décomposition du système global en un ensemble de systèmes simples composés chacun de deux machines séparées par un stock. Ces méthodes de décomposition sont en général plus précises que les méthodes d'agrégation. Les premiers travaux relatifs à ces méthodes ont permis d'élaborer un algorithme itératif pour des lignes de production homogènes qui a été étendu par la suite aux lignes non-homogènes [Gershwin, 1987a, 1987b]. Le principe de ces méthodes est de décomposer une ligne L constituée de N machines en $N-1$ sous-lignes $L(i)$ allant de 1 à $N-1$. Chaque sous-ligne $L(i)$ est modélisée par une machine amont $M_a(i)$ et une machine aval $M_v(i)$ séparées par un stock $B(i)$.

La machine amont $M_a(i)$ modélise la partie de la ligne L en amont du stock B_i et la machine aval $M_v(i)$ modélise la partie de la ligne en aval de ce même stock. La méthode cherche à identifier les paramètres inconnus (taux de défaillance et de réparation des machines amont et aval) de chaque sous-ligne $L(i)$ dans le cas homogène. Dans le cas non-homogène, il faut déterminer en plus des paramètres précédents, les taux de production maximums (capacités).

Le calcul des paramètres est réalisé de telle sorte que le flux des produits qui rentre dans le stock $B(i)$ se rapproche au maximum du stock B_i de la ligne réelle. Ces paramètres sont identifiés grâce à un algorithme appelé DDX (acronyme des initiales des auteurs) dont le critère de convergence est une équation de conservation de flux [Dallery et al., 1989]. Des améliorations ont été proposées dans [Burman, 1995] et ont abouti à l'algorithme ADDX (Accelerate DDX) plus robuste et plus rapide. Cette technique de décomposition est illustrée sur la Figure 1.21.

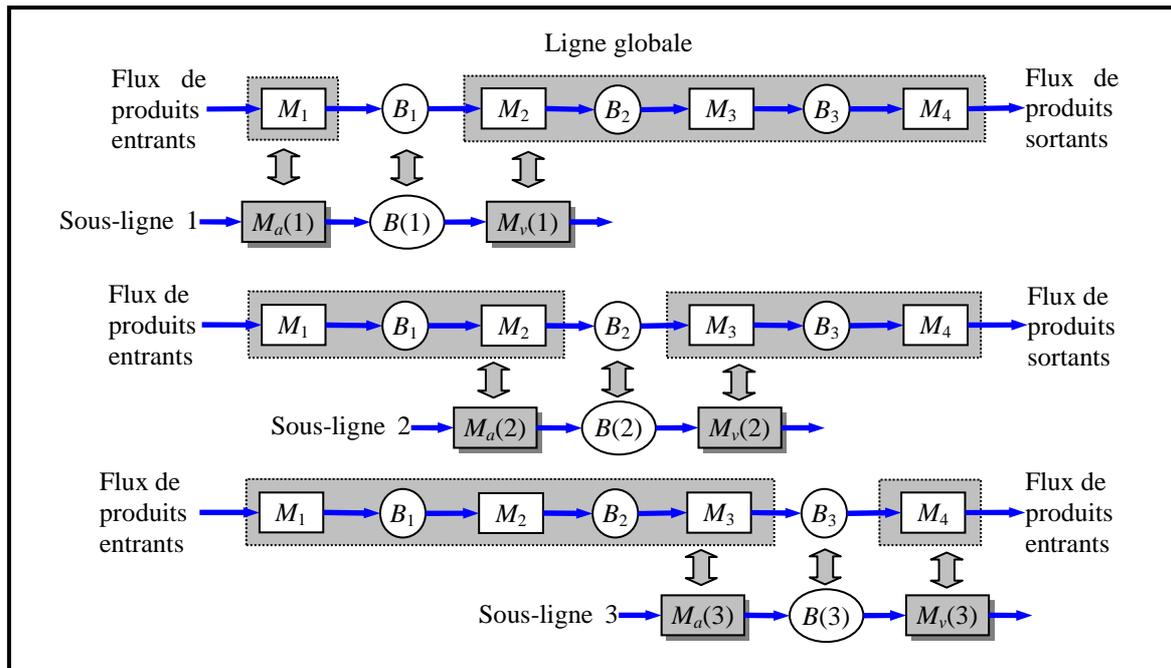


Figure 1.21 : Décomposition d'une ligne de production à quatre machines.

Dans ce contexte, la méthode de décomposition introduite initialement par Gershwin [Gershwin, 1987a] a été étendue à des lignes comportant de modules d'assemblage et de désassemblage avec des temps de traitement déterministes [Gershwin and Burman, 2000 ; Kouikoglou, 2002] et non-déterministes [Helber, 1998 ; Manitz, 2008]. De son côté, Jang [Jang, 2007] traite l'approche de décomposition dans le contexte multi-produits, alors que Tolio et al. [Tolio et al., 2002] étendent cette approche aux systèmes où les machines peuvent atteindre différents états de panne.

Si ces méthodes approximatives permettent de réduire la complexité de l'analyse des systèmes de production en se ramenant à l'étude d'éléments simples, l'étude du système dans sa globalité reste néanmoins difficile, plus précisément dans la gestion des interactions entre les éléments issus de la décomposition. Pour remédier à ces problèmes, on a souvent recours à la simulation comme outil d'évaluation des performances.

6.2. Analyse et évaluation par modèle de simulation

Par rapport aux méthodes analytiques, la simulation permet l'étude de systèmes plus complexes et plus réalistes (interactions complexes entre entités, événements aléatoires, etc) où le régime transitoire et son effet sur les performances sont pris en compte. Néanmoins, si les méthodes analytiques sont souvent insuffisantes pour complètement caractériser les régimes transitoires, elles peuvent être parfois plus performantes que la simulation pour les régimes permanents [Ershler et Grabot, 2001].

Dans cette partie, nous nous intéressons à la problématique de la simulation et de son application pour l'analyse et l'évaluation des systèmes de production à forte densité de flux [Law and Kelton, 2000]. Dans ce contexte, l'évaluation par simulation consiste à faire varier les facteurs d'expérience (paramètres et/ou structure du modèle), à observer et à comparer les sorties (indicateurs de performance) afin de retenir la meilleure solution [Ait Hssain, 2000]. Cette démarche se décompose en plusieurs étapes :

- Développer le modèle.
- Mener des expérimentations avec ce modèle (exécuter pas à pas le modèle).
- Interpréter les observations fournies par le déroulement du modèle à partir des critères de performance (sous forme de statistiques).
- Recommencer (raffiner le modèle, modifier les hypothèses, etc.) si les valeurs des indicateurs de performance ne sont pas satisfaisantes.

La Figure 1.22 illustre brièvement ce processus de simulation.

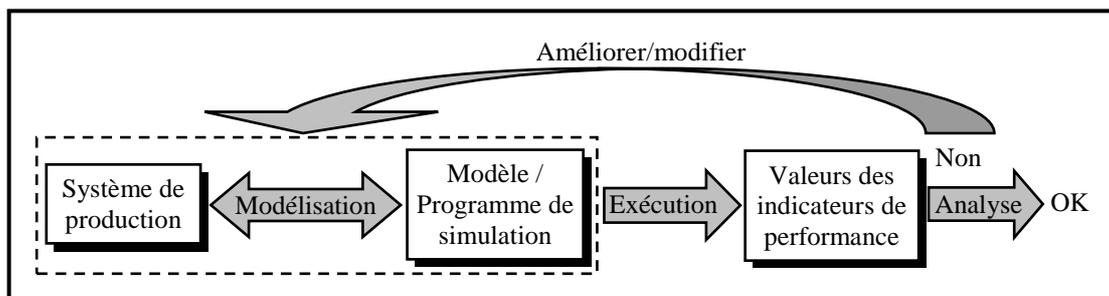


Figure 1.22 : Processus d'évaluation par simulation.

D'une manière générale, la simulation consiste à étudier et à analyser l'évolution de l'état d'un système à travers la variable temps. Le temps peut être vu comme continu ou discret, selon que les états du système sont spécifiés de manière dénombrable ou non. Dans ce cas, on parle de simulation discrète ou continue. Un survol des travaux de recherche existants montre que la simulation à événements discrets est d'un usage plus large que la simulation continue [Pierreval, 2006 ; Pierreval et al., 2007]. En effet, choisir de construire un modèle discret ou continu dépend avant tout des objectifs spécifiques de l'étude. Law et Kelton [Law and Kelton, 2000] citent pour illustrer cette idée la simulation du trafic routier d'une autoroute. Si on souhaite représenter le mouvement de chaque véhicule, un modèle discret est nécessaire. En revanche, si le trafic peut être traité de manière globale et agrégée, celui-ci sera décrit par des équations différentielles dans un modèle continu. De leur côté, Ruiz Usano et al. [Ruiz Usano et al., 1997] précisent que la simulation continue (la dynamique des systèmes en particulier) est particulièrement adaptée pour une analyse des tendances d'évolution sur un horizon à moyen ou à long terme.

6.2.1. La simulation discrète (à événements discrets)

A. Principe

Le principe de la simulation à événements discrets consiste à représenter l'évolution d'un système au cours du temps à travers des variables d'états qui changent aux instants d'occurrences des événements (un événement étant défini comme une occurrence instantanée qui peut faire changer l'état d'un système). Ce principe est simple mais la quantité de données à traiter et à stocker lorsque la densité des produits est élevée, fait qu'il requiert d'importantes ressources en termes de temps d'exécution et d'espace de stockage.

La simulation à événements discrets (Cf. Figure 1.23) implique que les changements d'états s'effectuent de manière discrète dans le temps [Banks et al., 1995]. Classiquement, le temps est représenté par une variable appelée « horloge de simulation ». Dans ce cas, la progression de l'horloge est gérée par événements. En effet, le noyau récupère de l'échéancier la date du prochain événement à exécuter, avance l'horloge de simulation à cette date, et effectue ensuite la logique de changement d'état correspondant à l'événement. Le temps progresse ici par

sauts (par pas variables) en fonction des événements à traiter. L'intérêt majeur de ce type de simulation apparaît lorsque les phénomènes simulés utilisent des échelles de temps très différentes [Cho, 2005].

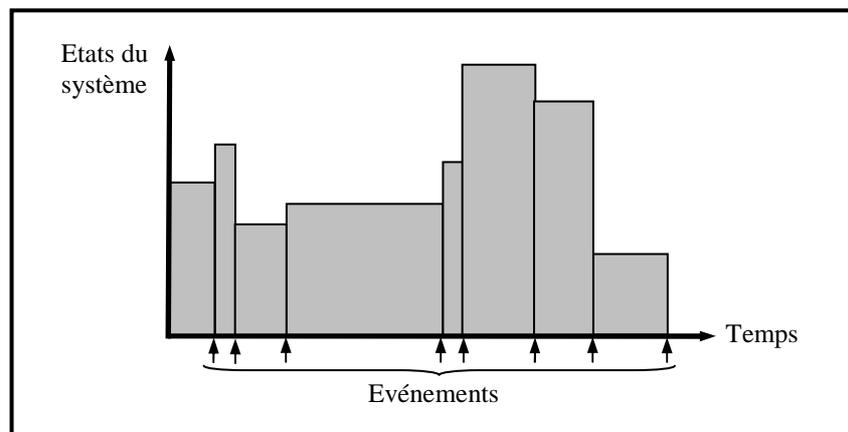


Figure 1.23 : Simulation à événements discrets.

B. Illustration

Nous allons illustrer le mécanisme de simulation à événements discrets à travers l'approche de modélisation par composants proposée dans [Bakalem, 1996]. Cette approche est basée sur le concept de « Système de Traitement du Produit (*STP*) ». Ce dernier est vu comme un processeur (un objet informatique) possédant toutes les caractéristiques d'une ressource de production. Il réalise principalement les trois opérations de base : la réception, la transformation et la fourniture. Chacune des trois opérations traduit une facette du comportement de la ressource.

- L'opération de réception : suppose que la pièce à recevoir est disponible, que la capacité de la ressource concernée n'est pas saturée et que cette ressource est prête à la réception.
- L'opération de transformation : consiste à retenir l'entité pendant un certain temps « T » défini par la gamme de production (temps opératoire). L'occupation de la ressource au-delà de « T » est considérée comme un blocage de la ressource. La durée « T » peut être nulle pour certaines ressources (par exemple un stock).
- L'opération de fourniture : consiste à libérer la ressource concernée et à fournir le produit transformé à la ressource consécutive définie par la gamme de fabrication. La réalisation de cette opération suppose que la ressource suivante est prête à la recevoir.

En adoptant ce concept, chaque ressource du système de production (machine ou stock) peut être modélisée par un *STP*. Dans ce cas, le modèle global peut être vu comme un réseau de plusieurs *STP* en interconnexion. La dynamique du système est représentée par le flux physique traversant ces derniers (l'ensemble des entités qui circulent dans le système). Cette structure à base de *STP* est fondée sur une simulation à événements discrets où un cycle interne est exécuté pour chaque produit.

Afin d'illustrer le processus de simulation par *STP*, considérons, à titre d'exemple, la vue partielle de deux *STP* en série où les opérations fondamentales sont représentées (Cf. Figure 1.24). Si on considère un seul *STP* (en supposant qu'il n'y a pas de panne), les événements les plus significatifs sont (Cf. Figure 1.25) :

- Les événements « début de transformation » et « fin de transformation »,

- L'événement « arrivée d'une entité »,
- Eventuellement les événements « début blocage » et « fin blocage ».

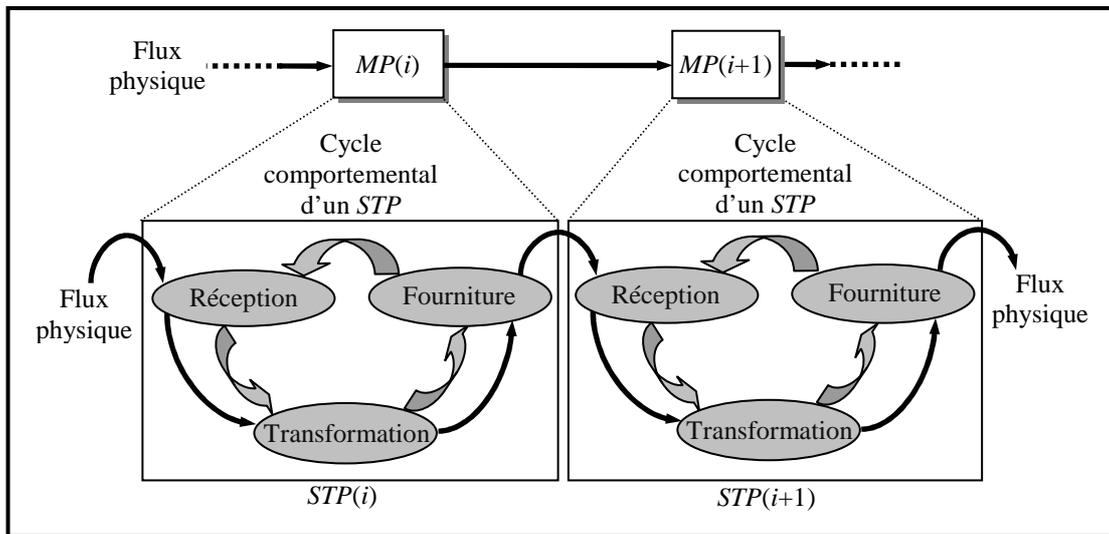


Figure 1.24 : Représentation des opérations fondamentales d'un STP.

La logique de simulation de ce modèle est illustrée sur la Figure 1.25 [Bakalem, 1996]. En l'absence de blocage et sachant que les opérations de « Fourniture » et « Réception » sont supposées instantanées, il est clair que l'événement « fin transformation » du STP(i) est équivalent à l'événement « début de transformation » du STP(i+1). Par contre, en présence d'un blocage, l'événement « fin transformation » correspond à l'événement « début blocage » du même STP. De même, l'événement « fin blocage » du STP(i) correspond à l'événement « début transformation » du STP(i+1). Par ailleurs, l'événement « fin transformation » du STP(i+1) sur un produit correspond à l'événement « fin blocage » du STP(i) sur le produit suivant dans la file d'attente du STP(i+1). Enfin, l'événement « arrivée d'une entité » (produit) reste un événement significatif pour le STP car il correspond à l'événement « début transformation » du premier STP de la gamme.

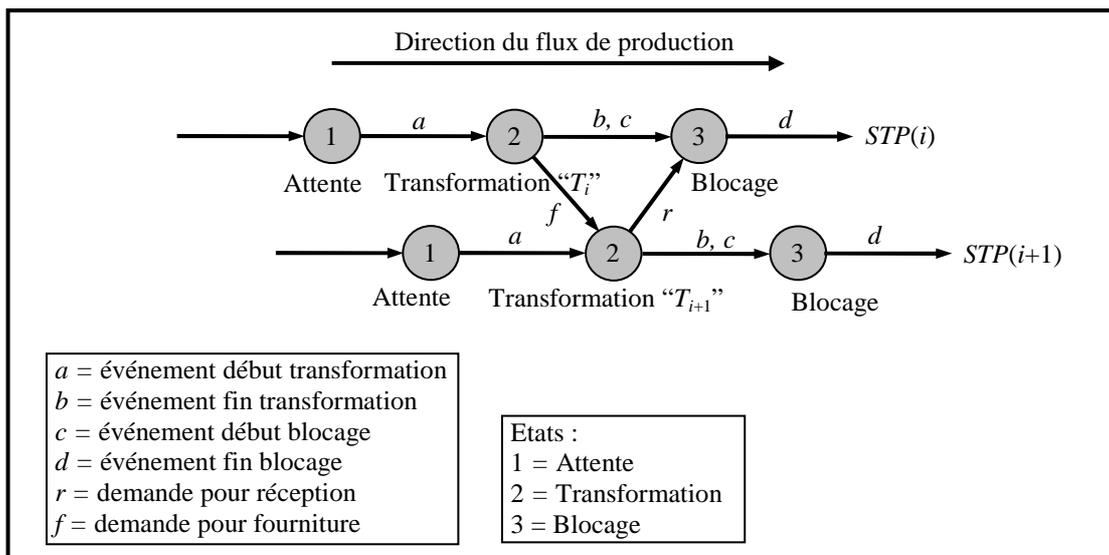


Figure 1.25 : Diagramme d'états simplifié d'un STP.

Dans le diagramme des états d'un *STP* (Cf. Figure 1.25), il apparaît que les événements « fin de transformation » et « arrivée d'une entité » sont les plus significatifs. En effet, l'occurrence de l'événement « fin transformation » sur le *STP*(*i*) déclenche la procédure suivante [Bakalem, 1996] :

- Si le *STP*(*i*+1) n'est pas prêt à recevoir l'entité, alors le *STP*(*i*) devient bloqué. Dans le cas contraire, il va commencer la transformation, prévoir la date de l'événement « fin transformation » qui lui est associée et l'introduire dans l'échéancier.
- Si le *STP*(*i*) ne peut pas fournir une entité et/ou le *STP*(*i*+1) ne peut pas la recevoir, alors ce dernier restera en attente jusqu'à l'occurrence du prochain événement le concernant.

L'occurrence de l'événement « arrivée d'une entité » implique la création d'une entité et son envoi vers le premier *STP* de sa gamme.

Pour mieux appréhender ce concept de simulation, nous allons l'appliquer pour simuler l'exemple donné dans le paragraphe §5.5.2.

Dans ce cas, le système de production composé de 4 modules de productions élémentaires est représenté par 4 *STPs* machines et 5 *STPs* stocks notés *STK* comme illustré sur la Figure 1.26.

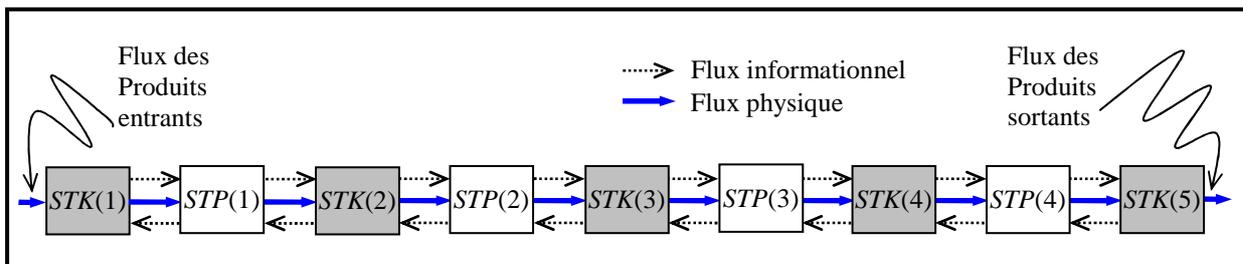


Figure 1.26 : Modèle conceptuel *STP* de la ligne de production.

Les stocks *STK* sont supposés avec des temps de transformation nuls. Cette conceptualisation a donné lieu à une plateforme de simulation dénommée Apollo [Berchet, 2000 ; Habchi and Berchet, 2003]. Le modèle de simulation associé à notre exemple est illustré sur l'interface de simulation de la Figure 1.27. Pour pouvoir simuler le modèle *STP* obtenu, nous rappelons les valeurs des paramètres du système :

$$\begin{aligned}
 \mu_1 &= 0.5, & \lambda_1 &= 0.3, & \tau_1 &= 0.5, & x_1^{\max} &= 3, \\
 \mu_2 &= 0.2, & \lambda_2 &= 0.05, & \tau_2 &= 0.3, & x_2^{\max} &= 4, \\
 \mu_3 &= 0.3, & \lambda_3 &= 0.2, & \tau_3 &= 0.6, & x_3^{\max} &= 6. \\
 \mu_4 &= 0.3, & \lambda_4 &= 0.01, & \tau_4 &= 0.7, & &
 \end{aligned}$$

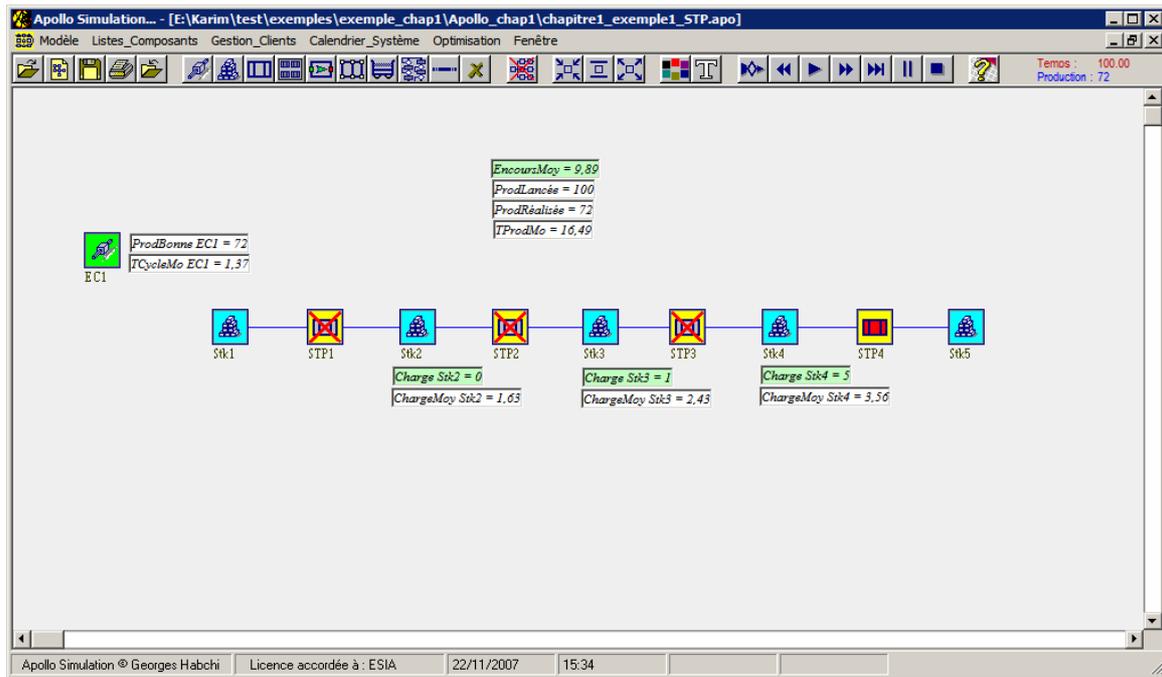
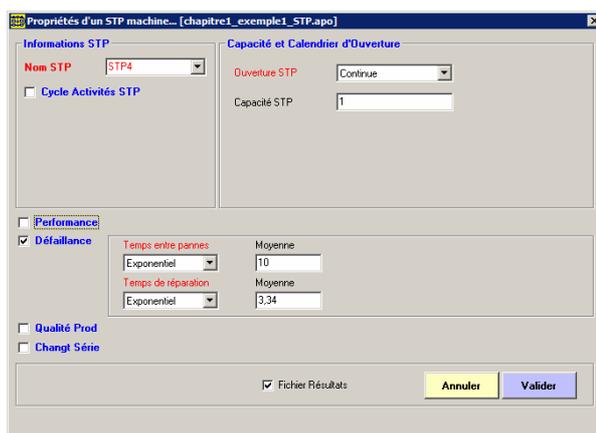


Figure 1.27 : Interface de la plateforme Apollo pour la simulation STP.

La paramétrisation du modèle de simulation STP consiste à définir :

- les paramètres des stocks (taille, type, ...),
- les paramètres de chaque STP (capacité, défaillance, ...) et
- la gamme de fabrication de l'entité à produire.

Ces paramètres sont spécifiés via les interfaces utilisateurs illustrées sur la Figure 1.28 et la Figure 1.29.



(a)



(b)

Figure 1.28 : Paramétrisation sous Apollo : (a) d'un STP, (b) d'un Stock.

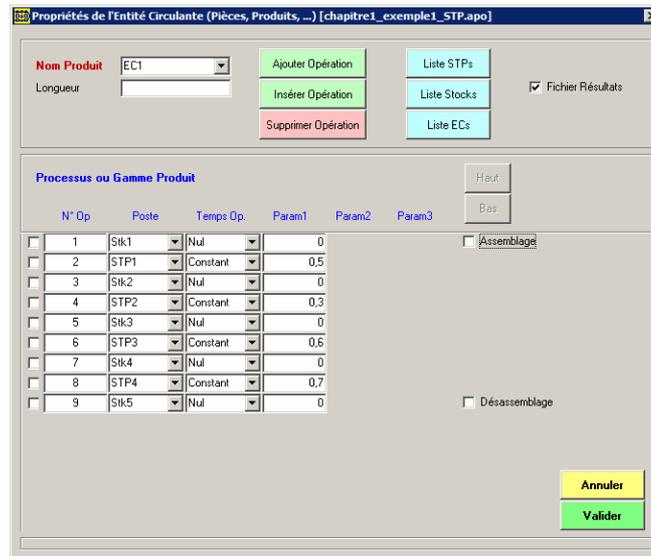


Figure 1.29 : Gamme de fabrication sous Apollo.

Les lancements de produits sont fixés de sorte à assurer que le système travaille au maximum de sa capacité. Le temps de simulation (horizon de production) est fixé à 100 unités de temps. Les résultats de simulation (évolution de la charge des stocks) sont illustrés sur la Figure 1.30 et la Figure 1.31.

La Figure 1.30.b montre, pour un nombre restreint d'échantillons, l'évolution de la variable charge du stock $STK(2)$ selon la logique de simulation par STP . En effet, les événements instantanés e_1 et e_2 correspondent à :

- l'opération « fourniture » et l'événement « fin de transformation » sur le $STP(1)$,
- les opérations « réception / fourniture » sur le stock $STK(2)$ et
- l'opération « réception » et l'événement « début de transformation » sur $STP(2)$.

Le temps d'attente en stockage dans $STK(2)$ est nul.

Par contre, dans le cas des événements e_3 et e_4 correspondant respectivement à :

- l'opération « fourniture » et l'événement « fin de transformation » sur $STP(1)$,
- l'opération de « réception » sur le stock $STK(2)$,

le temps d'attente T en stock $STK(2)$ n'est pas nul. L'occurrence de l'événement e_5 à la fin du temps T correspond alors à l'opération « fourniture » sur le stock $STK(2)$ et à l'opération « réception » ainsi que l'événement « début transformation » sur le $STP(2)$.

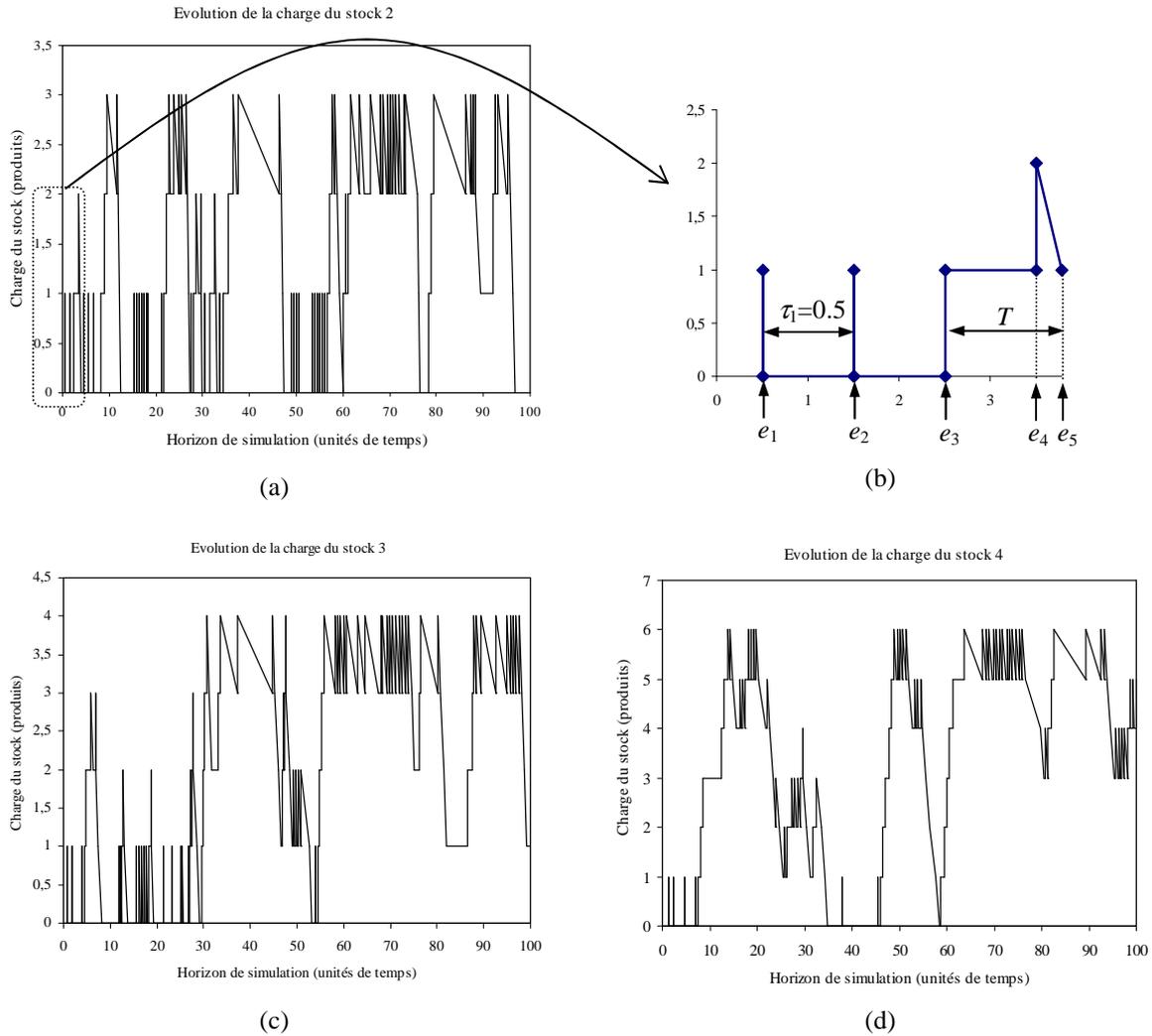


Figure 1.30 : Evolutions de la charge des stocks intermédiaires par simulation du modèle *STP*.

La Figure 1.31 illustre l'évolution de la production finie cumulée.

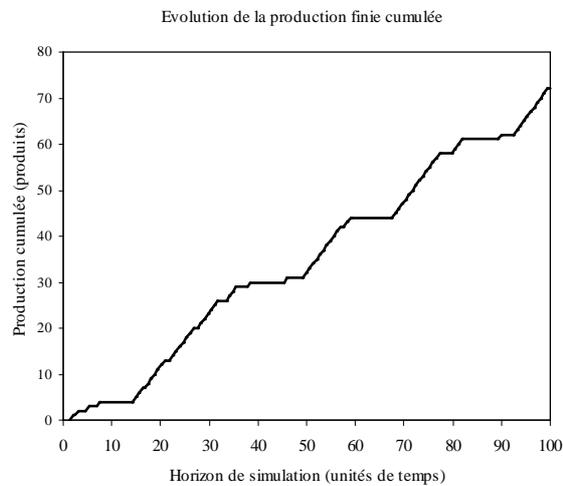


Figure 1.31 : Evolution de la production finie cumulée par simulation du modèle *STP*.

6.2.2. La simulation continue

A. Principe

La simulation continue concerne la représentation d'un système dont les variables d'état évoluent continuellement au cours du temps. Les relations entre les variables d'état du modèle continu reposent sur des équations différentielles ou sur des équations aux différences finies (approximation du cas continu) [Thiel, 1993].

La simulation continue est fréquemment utilisée pour simuler des systèmes de production relevant de l'industrie dite de « process ». Par exemple, Dégrés et al. [Dégrés et al., 2005] l'ont utilisé pour simuler un système de production métallurgique. Pierreval [Pierreval, 2006] souligne l'intérêt d'une simulation combinée continue-discrète, appelée aussi hybride, pour l'aide au pilotage d'une fonderie lourde. La simulation continue est aussi utilisée selon la dimension spatiale et temporelle du système simulé. Par exemple, Caux [Caux, 2006] développe une procédure d'agrégation des flux pour la simulation continue de réseaux de sites industriels, alors que Pierreval et al. [Pierreval et al., 2007] déclinent une démarche de simulation continue sur une chaîne logistique dans l'industrie de l'automobile.

Dans notre contexte d'étude, des simulateurs à flux continu exhibant une meilleure précision et rapidité comparés aux simulateurs conventionnels discrets ont été développés [Kouikoglou and Phillis, 1997b ; Kouikoglou, 2002]. Parmi les outils permettant leur mise en œuvre, nous citons les bond graphs [Dauphin-Tanguy, 2003], les réseaux de Petri continus [Alla and David, 1998] ou encore la dynamique des systèmes [Dégrés et al., 2005]. Dans le cas de cette dernière, un des fondements est l'idée que les performances en production sont mieux évaluées si l'on s'intéresse aux flux qui les régulent plutôt qu'aux éléments qui les composent [Caux, 2006].

En pratique, la simulation continue est souvent implantée selon une vision discrétisée (échantillonnée). Dans ce cas, la progression de l'horloge est supposée à pas fixe (aussi appelé synchrone). En effet, l'horloge de simulation progresse par pas constant $\delta t_n = t_{n+1} - t_n$ où t_n est l'instant de discrétisation ou d'échantillonnage (Cf. Figure 1.32.b). À l'étape n , de date $n\delta t_n$, le noyau sélectionne les événements qui auraient dû être simulés durant l'intervalle $[(n-1)\delta t_n, n\delta t_n]$ et considère qu'ils ont lieu à la date $n\delta t_n$ et les traite. Dans ce cas, la règle veut que le pas de discrétisation δt_n soit la plus petite échelle de temps dans le modèle continu utilisé.

La Figure 1.32 présente l'évolution d'un modèle de simulation continue à travers le temps.

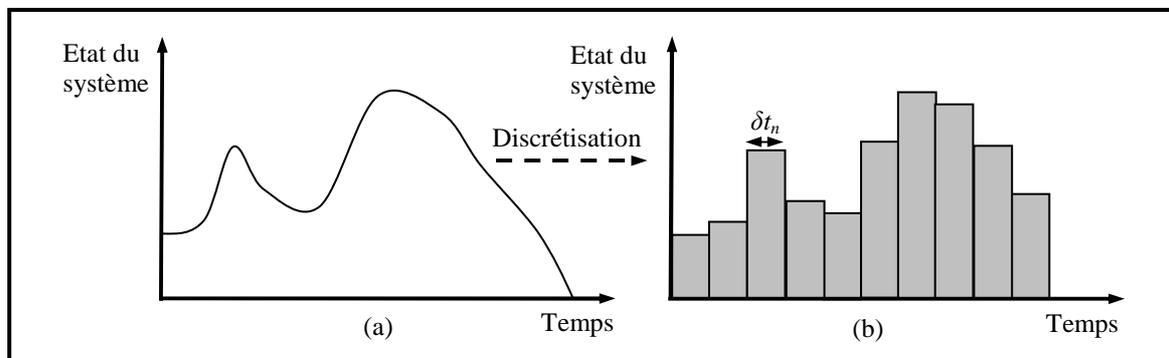


Figure 1.32 : (a) Simulation continue, (b) Simulation discrétisée.

Un résumé des concepts de simulation abordés et leur correspondance avec la gestion du temps est donné sur la Figure 1.33.

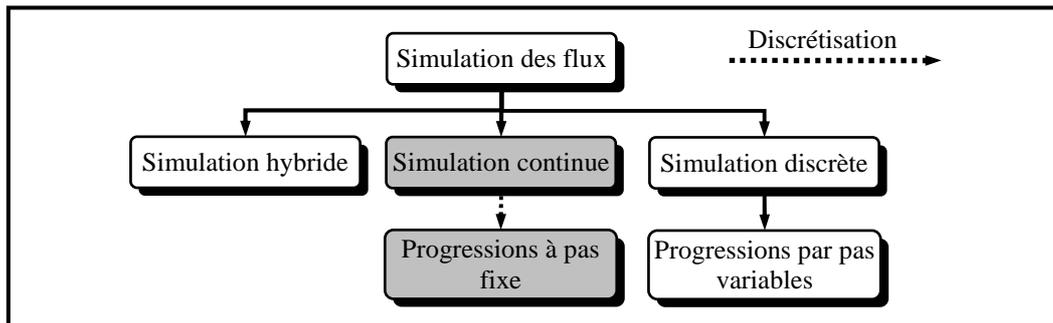


Figure 1.33 : Correspondance entre modèle de simulation et gestion du temps.

B. Illustration

Nous reprenons l'exemple de la ligne de transformation traitée dans le paragraphe §5.5.2 pour illustrer le concept de la simulation continue. Nous rappelons le modèle fluide obtenu pour ce système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} = B \cdot \mathbf{u}(t) \\ y_4(t) = \int_0^t u_4(v) dv \end{array} \right.$$

Dans le cas déterministe, en supposant qu'il y a toujours des produits disponibles en entrée, la sortie du système et les niveaux des stocks intermédiaires peuvent être déterminées analytiquement à partir de la représentation d'état. Cependant, la présence de pannes aléatoires rend cette résolution moins évidente. Dans ce cas, afin de valider le modèle obtenu en présence de phénomènes aléatoires, on peut avoir recours à la simulation.

Dans la simulation, la même configuration des paramètres utilisés précédemment est considérée. De la même manière, on suppose que le système doit travailler à chaque instant au maximum de sa capacité. Le taux de production de chaque module $MP(i)$ est alors défini selon les règles suivantes :

- Si la machine M_i est opérationnelle ($\alpha_i(t) = 1$), le niveau du stock en amont n'est pas vide ($x_{i-1}(t) > 0$) et le niveau du stock en aval n'est pas plein ($x_i(t) < x_i^{\max}$) alors le taux de production est au maximum ($u_i(t) = u_i^{\max}$).
- Si la machine est en panne ($\alpha_i(t) = 0$), ou le stock en amont est vide ($x_{i-1}(t) = 0$), ou le stock en aval est saturé ($x_i(t) = x_i^{\max}$) alors le taux de production est nul ($u_i(t) = 0$).

Le modèle fluide a été implanté sous l'outil MATLAB/Simulink qui permet de simuler des systèmes continus et échantillonnés (Cf. Figure 1.34).

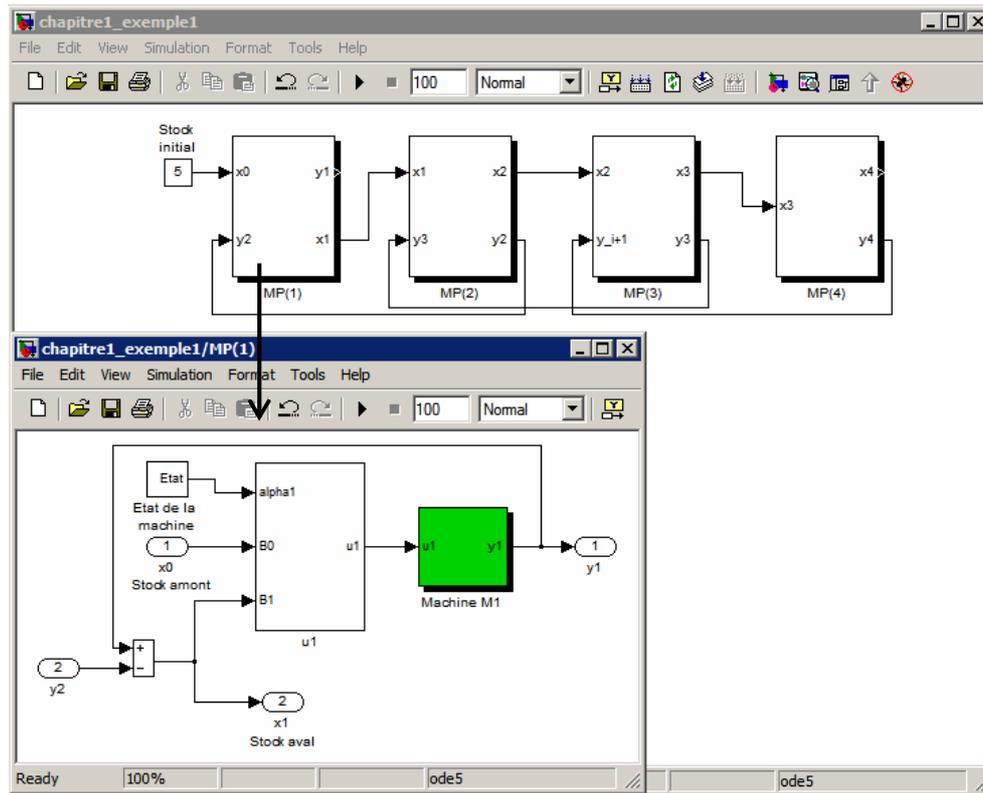


Figure 1.34 : Schéma d'implantation sous interface Matlab/Simulink.

L'horizon de simulation considéré est de 100 unités de temps. Les résultats de simulation sont illustrés sur la Figure 1.35 et la Figure 1.36.

La Figure 1.35 montre l'évolution du niveau de chaque stock intermédiaire (variables d'états du modèle fluide). Contrairement au cas précédent, la progression de l'horloge de simulation n'est pas dirigée par les événements mais par le pas de discrétisation. Dans notre cas, il est fixé à $\delta t_n = 0.1$ unité de temps qui correspond au temps opératoire le plus court.

La Figure 1.35.b montre bien que l'évolution de l'état du stock est continue avec des valeurs réelles et dont les changements de l'état n'interviennent qu'aux instants de discrétisation δt_n .

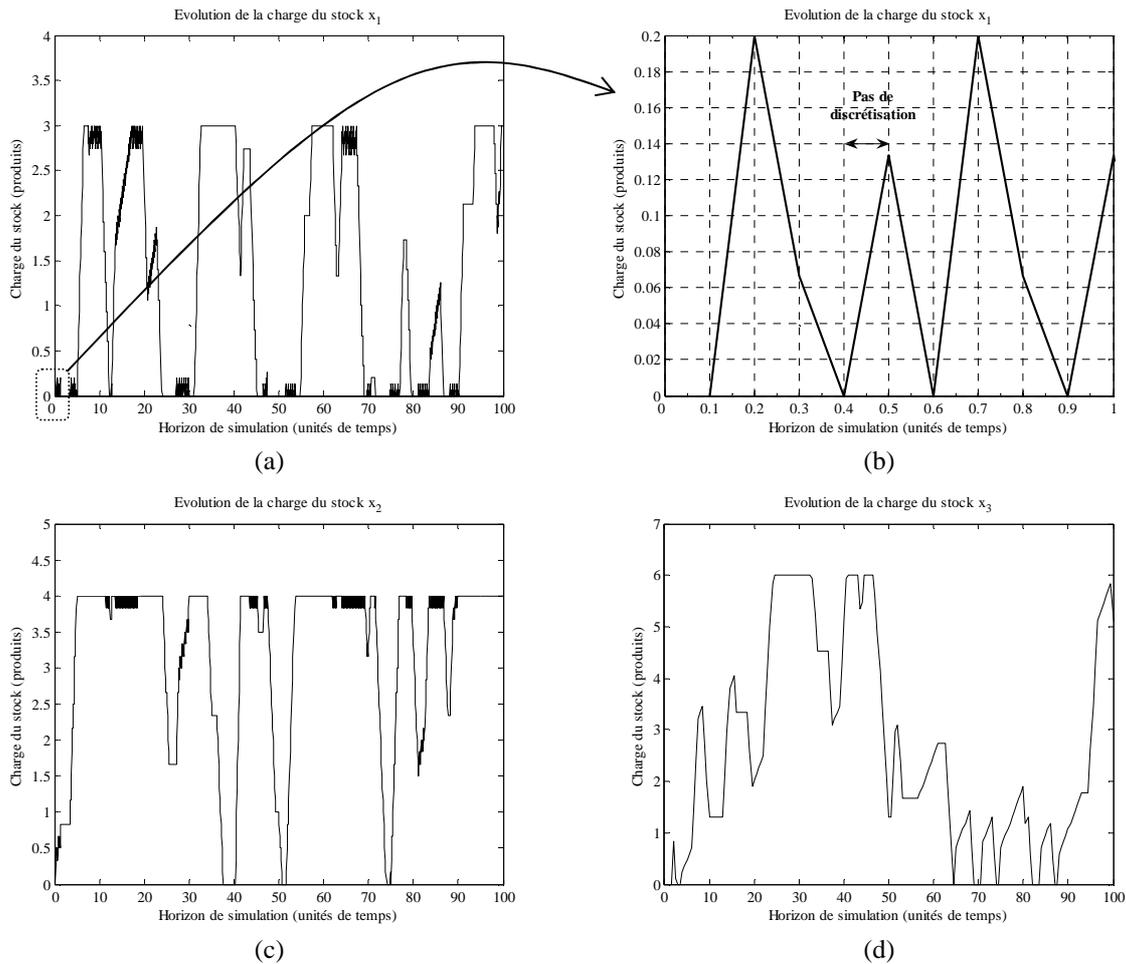


Figure 1.35 : Evolution des niveaux des stocks intermédiaires par simulation du modèle fluide.

L'évolution de la production cumulée en sortie du module *MP(4)* (produits finis) est illustrée sur la Figure 1.36.

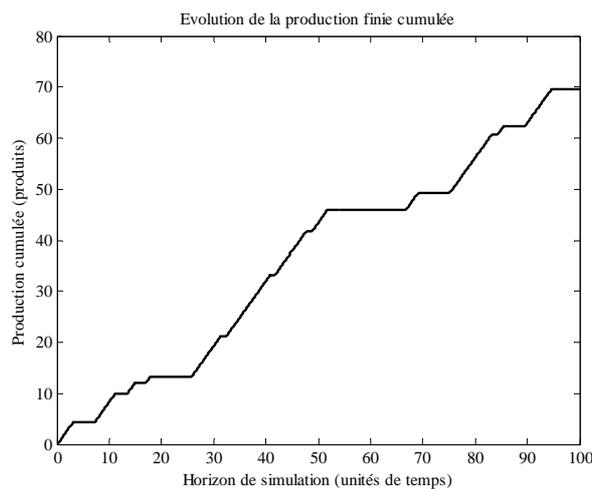


Figure 1.36 : Evolution de la production cumulée par simulation du modèle fluide.

Les quelques écarts entre les deux approches (simulations continue et discrète) s'expliquent par la différence des processus de simulation utilisés. Néanmoins, les performances globales sont relativement proches (encours global et production finale), ce qui montre que

l'approximation continue des flux n'introduit pas d'erreurs importantes sur les performances évaluées par rapport à la simulation à événements discrets (Cf. Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Comparatif des résultats des deux approches.

	Charge moyenne des stocks intermédiaires (produits)			Encours global moyen (produits)	Production finie (produits)
Modèle STP	1.3	2.5	3.67	7.47	72
Modèle fluide	1.79	2.49	2.16	6.44	69.57

Cette constatation, nous conforte dans l'idée d'utiliser cette modélisation des flux pour représenter la dynamique des systèmes de production et surtout dans la synthèse de stratégies de pilotage en s'inspirant de la démarche automatique (la théorie conventionnelle de l'automatique). Ceci est l'objet du prochain chapitre.

7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à :

- la présentation des différents travaux relatifs à la représentation, à l'analyse et à la simulation des flux de production,
- la justification de notre choix concernant la méthode d'évaluation et de simulation à base de modèle fluide.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons discuté les différentes organisations logiques et physiques des ressources composant un système de production. Ces dernières nous ont servi d'éléments de base pour la décomposition de systèmes complexes. Par la suite, sur la base d'une analyse bibliographique, nous avons distingué les différents modes de production afin d'exhiber la nature des flux circulant dans le système. Dans ce contexte, la densité des produits pose le problème de leur représentation. Ainsi, nous avons opté pour une représentation par modèle continu (fluide) et justifié notre choix d'une part, pour éviter la combinatoire inhérente à une modélisation discrète (dans le cas d'un système à haute cadence) et d'autre part, dans l'optique d'une synthèse de commande en s'appuyant sur des concepts de l'automatique des systèmes continus.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons abordé le volet de l'analyse et de l'évaluation des performances. En ce sens, nous avons distingué deux approches complémentaires, à savoir : les méthodes analytiques et la simulation. Nous avons alors décrit la simulation continue à base d'un modèle fluide et montré sur un exemple simple, via une comparaison avec une simulation à événements discrets, que l'approximation des flux de produits par modèle continu n'introduit pas d'erreurs significatives sur les performances mesurées.

Dans le chapitre suivant, nous allons montrer comment ce modèle peut être appliqué pour concevoir des stratégies de pilotage des flux de production.

CHAPITRE 2

Commande locale des flux de production

Chapitre 2 : Commande locale des flux de production

1. Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons décrit le modèle continu qui régit la dynamique des flux dans un système production. Le présent chapitre est consacré à la problématique de pilotage dont l'objectif est de proposer les fondements permettant de structurer notre approche et de la justifier.

Dans la littérature relative au pilotage des flux de production, trois familles de techniques sont traditionnellement utilisées : le pilotage en flux tirés, le pilotage en flux poussés et le pilotage en flux hybrides. Ce dernier est plus proche de la réalité du milieu industriel où se conjuguent les deux modes à flux tirés et à flux poussés. Ces trois familles de méthodes de pilotage se distinguent, essentiellement, par leurs modes de déclenchement de la production. En effet, en tenant compte de l'information prépondérante dans la décision de lancement de la production, une classification basée sur les trois paradigmes : jeton, temps et surplus est proposée dans [Gershwin, 2000]. Dans ce contexte, les techniques à base de surplus présentent l'avantage de pouvoir intégrer des méthodologies d'analyse et de synthèse à travers une vision « automatique ». En effet, sur la base du modèle continu des flux, le pilotage à base de surplus consiste à synthétiser une loi de commande capable de maintenir le bon suivi d'une trajectoire de demande et ce en dépit des perturbations et des aléas de fonctionnement.

Partant de la décomposition du système de production en modules élémentaires donnée dans le Chapitre 1, la problématique du pilotage d'un système consiste à contrôler les différents modules le constituant et assurer leur coordination. Dans ce cas, l'architecture globale de pilotage est de type multi-contrôleurs, distribuée et modulaire. En considérant un module de production élémentaire, le problème de pilotage (régulation) des flux le traversant revient à définir une stratégie adéquate d'allocation de capacité. Il s'agit de calculer le taux de production optimal sur la base des informations locales afin de garantir les performances spécifiées (fluidité des flux, suivi de la demande, ...) en présence de perturbations (pannes, rupture et blocage). Toutefois, cette architecture distribuée peut présenter des problèmes de synchronisation et de coordination entre contrôleurs locaux. Une solution à ces problèmes consiste à hiérarchiser la structure de pilotage en introduisant un deuxième niveau dont le rôle est de superviser et de coordonner les actions locales à partir des performances globales du système. Autrement dit, l'architecture de pilotage est décomposée en deux niveaux :

- Un niveau de « commande locale » qui a pour objectif la régulation des flux traversant chaque module de production élémentaire sur la base d'informations locales.
- Un niveau de « supervision » dédié à la coordination des interactions entre contrôleurs locaux et à l'optimisation du fonctionnement du système à partir d'informations globales.

Ce chapitre est dédié à la problématique de synthèse de la commande locale. Notre objectif est alors de présenter dans un premier temps les concepts développés dans la littérature pour ensuite proposer et justifier l'approche adoptée dans cette thèse. La synthèse du superviseur fera l'objet du troisième chapitre.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans la section 2, nous introduisons les différents niveaux de pilotage dans un système de production. Après avoir décrit la problématique de pilotage des flux dans la section 3, nous évoquons dans la section 4 l'organisation et la typologie des structures de pilotage afin de dégager l'architecture adoptée. Dans la section 5, la méthodologie de synthèse de la commande locale est détaillée. Ainsi, nous positionnons et nous justifions la méthode adoptée à travers une classification des approches de pilotage existantes. Nous analysons par la suite les approches de pilotage à base de surplus par allocation de capacité et plus particulièrement à travers le concept du point d'hésitation. Ce dernier constitue le principe sur lequel nous nous appuyons pour synthétiser le module de contrôle local (contrôleur local). Compte tenu des limites de cette approche dans le cas des systèmes complexes, nous proposons et nous détaillons dans les sections 6 et 7 notre approche de commande locale basée sur la théorie du contrôle flou. Dans la section 8, nous déclinons à travers un exemple de simulation la faisabilité de la méthode proposée. Avant de conclure, nous donnons un survol rapide sur la généralisation de cette méthodologie au cas multi-produits. Ce dernier point sera détaillé au Chapitre 4.

2. Pilotage des systèmes de production

Dans le cadre du pilotage des systèmes de production, une vision globale à cinq couches couramment utilisée dans la littérature est illustrée sur la Figure 2.1. Le rôle de chaque niveau est défini de la façon suivante [Hetreux, 1996 ; Giard, 2003] :

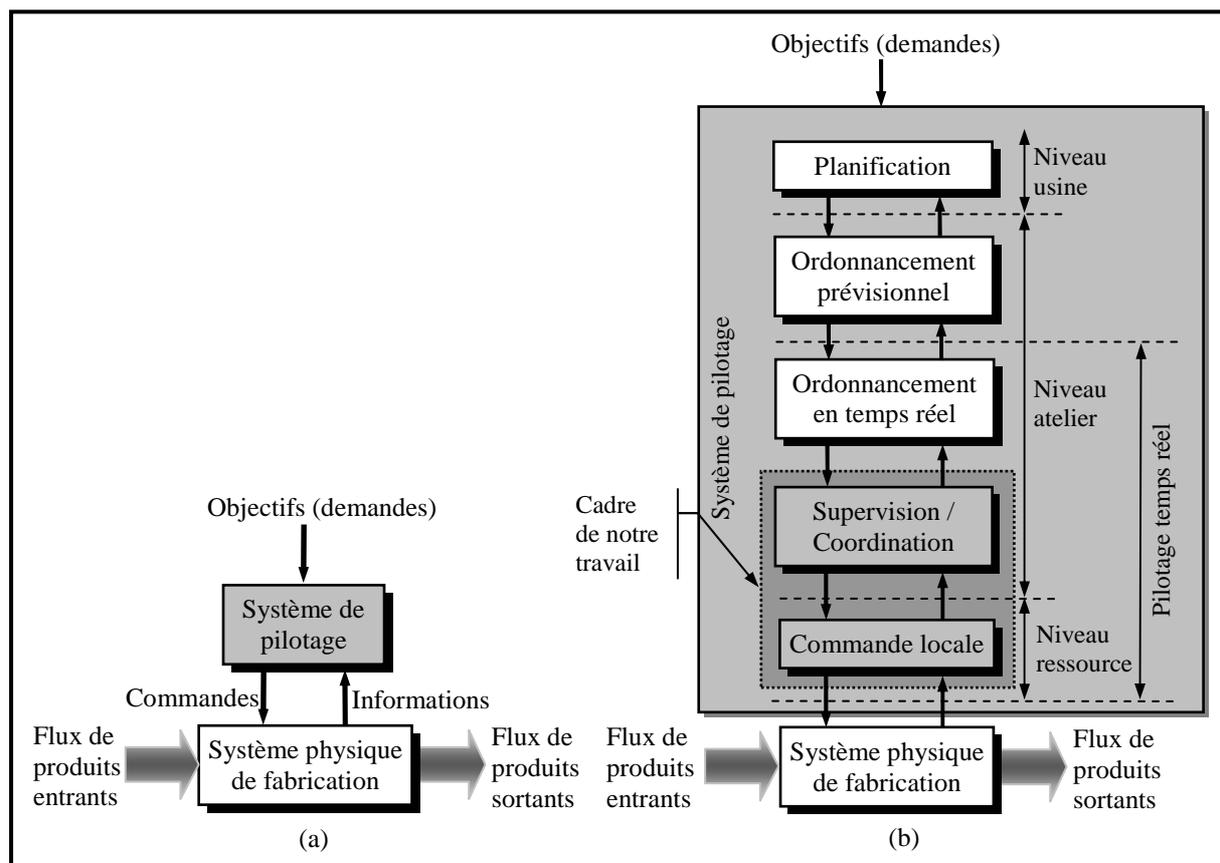


Figure 2.1 : La conduite hiérarchisée des systèmes de production.

- La planification : elle consiste à définir un plan de fabrication sur un horizon de temps en fonction du carnet de commande fourni par le client et des moyens de production. Ce plan fait apparaître des valeurs comme la quantité, la qualité, les délais de production et également une pré-allocation des ressources.
- L'ordonnancement prévisionnel : il permet de déterminer un ensemble d'ordres partiels de passage des produits à transformer sur les diverses ressources du système. Cette allocation tient compte de la pré-allocation des ressources, des délais, des contraintes de capacité et de disponibilité des ressources, des contraintes de séquençement d'opérations et enfin des critères à optimiser tels que le temps de production, les coûts, etc.
- L'ordonnancement temps réel : il assure la cohérence entre les décisions prévisionnelles et les contraintes temps réel issues du comportement réel du système. Ce niveau est souvent qualifié de « charnière » puisqu'il permet de gérer, en fonction de l'état réel des ressources, au mieux les degrés de liberté non encore explicités par les niveaux supérieurs.
- La supervision/coordination : elle permet de gérer de manière cohérente les interactions entre les différentes ressources du système en fonction des contraintes telles que les ressources partagées, séquençements obligatoires, synchronisations diverses ou parallélisme, etc. De par sa vision globale du système, le superviseur permet d'introduire des informations globales au niveau de la commande locale afin d'optimiser les différentes opérations du système physique.
- La commande locale : elle est le niveau le plus bas de la structure décisionnelle. Elle correspond à la jonction entre le procédé et le système de commande. La commande locale consiste en un enchaînement déterministe d'opérations à effectuer sur les ressources du système physique. Ainsi, la commande locale intègre des fonctions de poursuite et de régulation.

Le schéma de la Figure 2.1 peut être scindé en deux classes. La première classe regroupant les deux couches supérieures (la planification et l'ordonnancement prévisionnel) concerne essentiellement des problèmes de pilotage en temps non critique. Dans ce cas, le problème de pilotage est vu comme un processus décisionnel à un niveau stratégique. La deuxième classe, englobant les trois couches inférieures (ordonnancement en temps réel, supervision et commande locale) concerne un pilotage en temps réel où la proximité avec le système physique impose la prise en compte des contraintes réelles.

Sachant que la structure et le séquençement des tâches dans le système de production sont supposés connus et fixés a priori, le problème de pilotage en temps réel se limite à l'étude et à la conception des deux dernières couches, à savoir la commande locale et la supervision. C'est cette structure qui est adoptée dans cette thèse pour la conception d'un système de pilotage.

Il est important d'attirer l'attention du lecteur sur le fait que dans la littérature il existe de nombreuses interprétations concernant le positionnement des concepts contrôle / conduite / supervision dans le pilotage [Trentesaux, 2002]. En effet, dans [Dindeleux, 1992] l'auteur considère que la supervision est une composante du contrôle, alors que Berruet [Berruet, 1998] considère que la supervision intègre le contrôle. Dans le même état d'esprit, selon Archimède [Archimède, 1991] la conduite peut être assimilée à la composante décisionnelle du pilotage, alors que pour Longchamp [Longchamp, 1995] la conduite est synonyme de supervision.

D'autre part, Grabot et al. [Grabot et al., 1996] interprètent le rôle du pilotage d'atelier par celui de la régulation, qui regroupe l'ensemble des activités permettant la production à court terme en accord avec les objectifs établis par la gestion de production. Dans ce cas, l'action du pilotage consiste à adapter la production aux aléas pouvant survenir au niveau opérationnel ou de son environnement, et ce en modifiant certaines variables d'action (ordonnancement, gestion de la capacité, sous-traitance, etc.).

Dans cette thèse, un choix délibéré de séparation entre la commande locale et la supervision est considéré.

3. Problématique de pilotage des flux de production

Comme nous l'avons déjà abordé dans le premier chapitre, nous nous intéressons à des systèmes de production « gros volumes » où un modèle continu peut être utilisé pour représenter la dynamique des flux dans le système. Ainsi, nous avons proposé une décomposition du système en modules de production élémentaires *MP* non seulement pour faciliter sa représentation et son analyse mais aussi pour aider à la conception de son pilotage.

Dans ce contexte, au niveau de chaque module de production *MP*, les produits entrant subissent des opérations sur les machines. Ces dernières sont sujettes à des perturbations sous forme de pannes aléatoires. Selon le schéma d'interconnexion du système de production, ces perturbations se propagent aux autres modules de production via les stocks intermédiaires. Cette propagation se traduit par des phénomènes de rupture en aval du module défaillant et de blocage (saturation) en amont de ce même module.

D'une manière générale, piloter un système de production consiste à synthétiser un contrôleur capable, à partir des informations sur le système (ses états et ses sorties) et des objectifs (demandes, délais de production, ...):

- d'atteindre les performances de pilotage désirées en prenant des décisions, les meilleures au sens d'un certain coût tout en respectant les contraintes,
- de garantir le bon fonctionnement du système en présence des aléas de fonctionnement et de perturbations diverses.

En ce sens, étant donné un système de production défini par l'interconnexion d'un ensemble de modules de production, notre problématique de pilotage des flux réside dans les réponses apportées aux questions suivantes :

- Quelle structure de pilotage faut-il utiliser pour atteindre les performances désirées (centralisée, coordonnée, distribuée, supervisée, etc.) ? La réponse à cette question exige l'étude des différentes typologies de pilotage afin de sélectionner la mieux adaptée à notre problématique et au contexte considéré.
- Quelle méthodologie de synthèse faut-il exploiter pour réguler les flux de production dans le système et garantir le respect des spécifications (pilotage à base de temps, pilotage à base de jeton ou pilotage à base de surplus) ? La réponse à cette question nécessite la classification des différentes méthodes de pilotage disponibles dans la littérature, afin de pouvoir choisir celle qui répond le mieux à ces besoins.

Pour des raisons de simplicité et sans perte de généralité, la problématique de pilotage est abordée sur des lignes de transformation mono-produit. Néanmoins, elle reste transposable pour un fonctionnement en multi-produits pour des lignes d'assemblage et de désassemblage.

4. Typologie des structures de pilotage

Cette partie a pour objectif de présenter les principales structures de pilotage, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Dans ce cadre, partant d'un système de production composé de N modules de production $MP(i)$, différentes typologies peuvent être recensées dans la littérature [Dilts et al., 1991 ; Archimède, 1991 ; Habchi, 2001 ; Trentesaux, 2002].

4.1. L'architecture centralisée

Comme illustré sur la Figure 2.2, cette structure se caractérise par la fusion de l'ensemble des niveaux de pilotage dans un seul module central MC . Ce dernier, représente un noyau central autour duquel tous les modules de production $MP(i)$ sont regroupés.

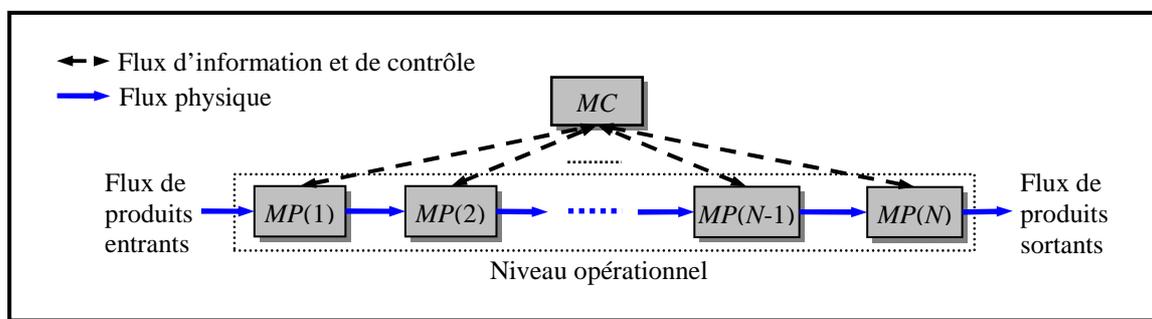


Figure 2.2 : Architecture de pilotage centralisée.

Ce module central MC pilote tous les modules de production élémentaires $MP(i)$ en prenant toutes les actions et les décisions nécessaires à leur fonctionnement (traitement des événements, synchronisation et coordination de toutes les tâches, ...).

Si cette structure présente l'avantage d'être facile à administrer du fait de l'absence de conflits (source unique de distribution des commandes) et d'un accès à l'ensemble des informations, elle présente un certain nombre d'inconvénients. En effet, la rigidité structurelle de cette architecture conduit d'une part, à une flexibilité réduite due à l'impossibilité de communication ou de coordination entre les $MP(i)$ (sauf par un passage via le module central MC) et d'autre part, à un manque de fiabilité due à l'indexation du fonctionnement du pilotage sur un module unique (absence de distribution de commandes). Ces inconvénients influent sur les performances du système (temps de réponse, réactivité, ...) et réduisent son déploiement sur des systèmes complexes ou à dimensions larges. C'est pour ces raisons que cette structure a été écartée dans le cadre de notre problématique de pilotage.

4.2. L'architecture hiérarchisée et/ou coordonnée

Cette architecture se caractérise par l'introduction de différents niveaux de pilotage pour former une organisation de contrôle pyramidale (Cf. Figure 2.3). Dans ce contexte, au premier niveau, selon la stratégie de regroupement adoptée (par deux par exemple), des modules de contrôle locaux MC sont utilisés pour maîtriser la dynamique des modules de production MP qui lui sont associés. Au deuxième niveau, un autre ensemble de contrôleurs est intégré pour piloter les modules de contrôle de niveau inférieur. Ce mécanisme va se poursuivre jusqu'à

atteindre le contrôleur global (superviseur) au sommet de la pyramide [Bongaerts et al., 2000].

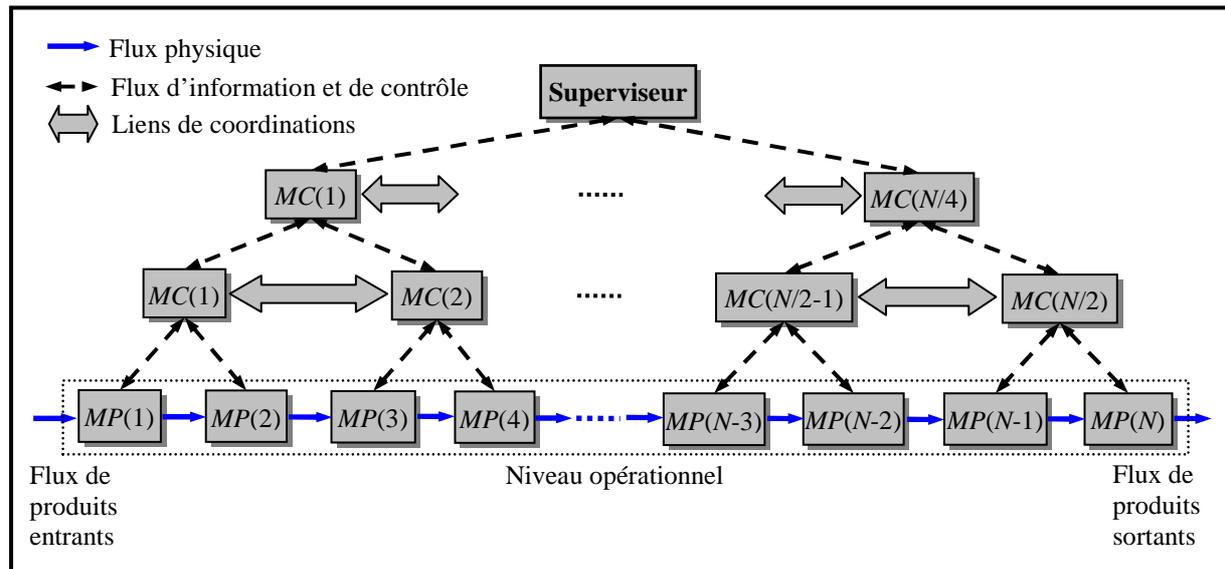


Figure 2.3 : Architecture de pilotage hiérarchisée et/ou coordonnée.

A un niveau donné, chaque module de contrôle MC pilote les modules du niveau inférieur et fournit ses résultats au module de niveau supérieur. En présence d'échange d'informations entre les modules de pilotage du même niveau, on parle d'une structure coordonnée [Berchet, 2000]. Dans le cas contraire, la structure est dite uniquement hiérarchisée.

Si cette approche présente les avantages d'une implémentation graduelle avec une prise en compte des informations locales, une facilité dans sa conception réduisant ainsi les problèmes de développement (les modules de pilotage sont moins complexes) et un semblant d'autonomie, elle présente néanmoins quelques inconvénients. En effet, l'augmentation du nombre de connexions entre les niveaux de pilotage peut rendre le mécanisme de décision complexe. Autrement dit, cette structure reste soumise aux problèmes liés à la multitude des niveaux hiérarchiques de pilotage qui peuvent mener à des conflits dans les décisions prises. Ces inconvénients ont motivé notre décision de ne pas exploiter cette approche dans la conception de notre système de pilotage.

4.3. L'architecture distribuée

Pour remédier aux inconvénients des structures précédentes, plusieurs auteurs ont proposé l'exploitation d'une structure distribuée [Duffie and Prabhu, 1996 ; Trentesaux, 2002]. Dans ce contexte, une structure distribuée, appelée aussi « décentralisée » consiste à associer à chaque module de production $MP(i)$ un module de contrôle $MC(i)$ (Cf. Figure 2.4).

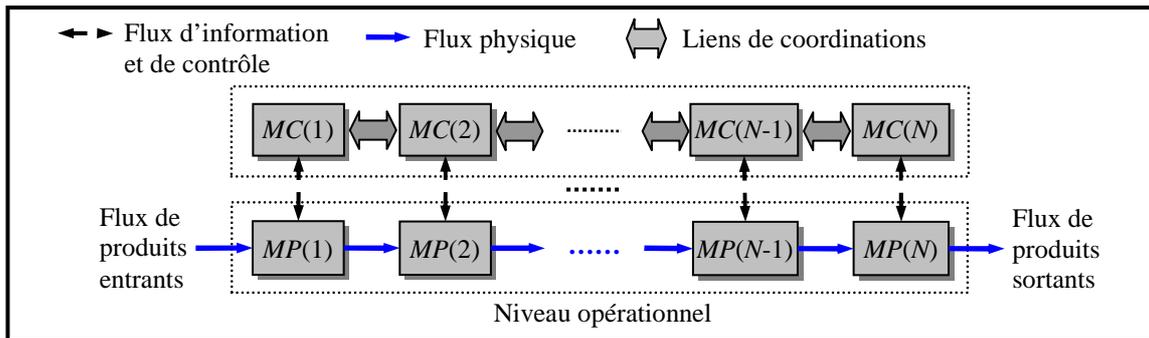


Figure 2.4 : Architecture de pilotage distribuée.

Cette structure considère que chaque module de contrôle est autonome et coopère avec l'ensemble des autres modules, d'où sa grande flexibilité et sa relative tolérance aux perturbations. De plus, de part sa modularité, cette approche simplifie la synthèse de la commande locale en se limitant aux seules informations locales.

Si cette structure s'adapte bien pour une stratégie de pilotage local, malheureusement il est difficile d'optimiser et de coordonner d'une manière globale le comportement du système piloté. Dans ce cas, afin de remédier à ce problème, il est nécessaire de faire appel à un module de niveau plus élevé capable d'avoir une visibilité sur l'ensemble des modules de contrôle locaux. Cette philosophie conduit à enrichir la structure distribuée par un superviseur, ce qui mène à la structure distribuée-supervisée détaillée dans le paragraphe suivant.

4.4. L'architecture distribuée-supervisée

Cette structure (Cf. Figure 2.5) a été proposée pour combiner les avantages d'une structure centralisée et d'une structure distribuée [Trentesaux, 1996]. Une telle structure doit permettre un pilotage optimal, efficace et une réactivité et une robustesse vis-à-vis des perturbations. Dans cette structure, chaque module de pilotage garde son autonomie de décision mais peut demander « conseil » au module de niveau supérieur (le superviseur). Le rôle de ce dernier est de coordonner, résoudre les conflits entre modules locaux et optimiser globalement le système piloté. En effet, pour agir efficacement il ne suffit pas d'optimiser localement les performances au niveau de chaque module de production, mais il est nécessaire d'adopter une approche globale. De plus, la présence d'objectifs antagonistes au sein de tout système de production renforce le besoin de recourir à un mécanisme d'aide à la décision au niveau supérieur du pilotage.

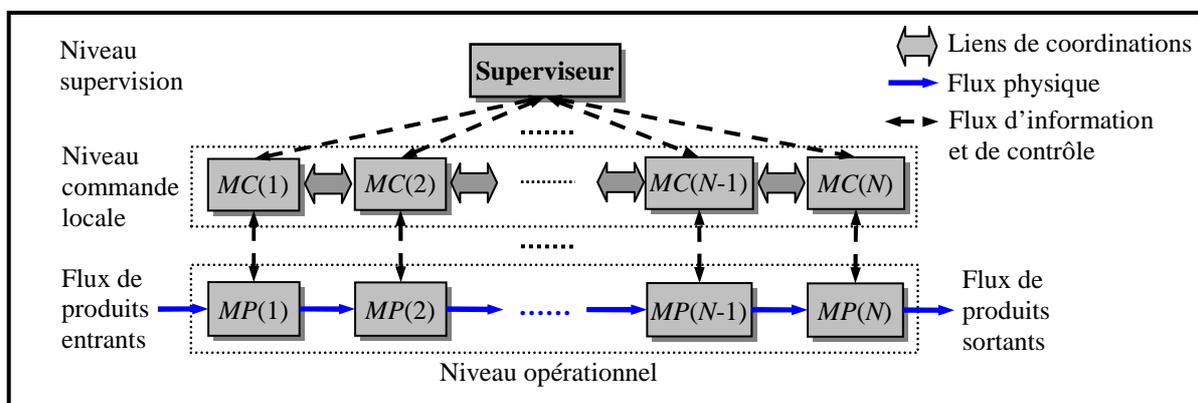


Figure 2.5 : Architecture de pilotage distribuée-supervisée.

En adoptant cette stratégie de pilotage pour un système de production composé de N modules $MP(i)$, sa conception consiste à :

- Synthétiser à base d'informations locales pour chaque module élémentaire $MP(i)$, un module de contrôle local $MC(i)$ capable de satisfaire les objectifs locaux désirés en termes de régulation et/ou de suivi de trajectoire (demande).
- Synthétiser un superviseur qui a pour objectif de coordonner le fonctionnement des modules de contrôle locaux afin de pouvoir atteindre les performances globales spécifiées.

Dans la suite de cette étude, nous allons expliquer les techniques et les mécanismes pouvant être utilisés pour le pilotage des flux de production à travers cette architecture distribuée-supervisée et leur déploiement sur les deux niveaux, à savoir la commande locale et la supervision. Une attention particulière est donnée au niveau de la commande locale dans ce chapitre. La problématique de la supervision fera l'objet du Chapitre 3.

La Figure 2.6 résume les différentes typologies de pilotage étudiées.

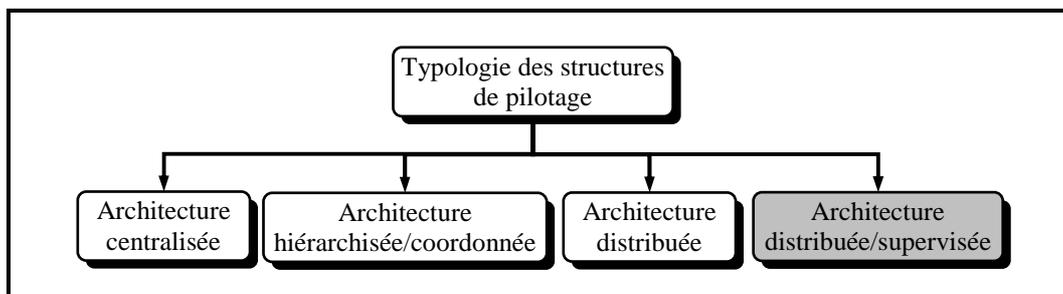


Figure 2.6 : Typologie des architectures de pilotage.

5. Méthodologie de synthèse de la commande locale

Contrairement à une approche de pilotage discrète où chaque produit est traité individuellement, le pilotage des flux (au niveau local) vise à réguler ces derniers afin de suivre en continu une trajectoire de référence (une demande).

L'objectif de cette partie est de décrire les fondements qui régissent les techniques de pilotage des flux au niveau local. Pour cela, nous introduisons dans un premier temps une classification des différentes méthodes de pilotage existantes [Gershwin, 2000]. Cette classification va nous permettre de positionner notre problématique par rapport à la littérature et de dégager ensuite les idées directrices de notre approche.

5.1. Classification des méthodes de pilotage des flux

Nous avons établi au premier chapitre une classification des systèmes de pilotage suivant le mode de déclenchement de la production (Cf. Figure 1.2). Dans ce contexte, nous avons retenu un mode de déclenchement à flux hybrides.

Dans la même philosophie, Gershwin propose une nomenclature de classification qui, quoique équivalente sous certaines conditions à la première classification donnée dans le Chapitre 1, repose sur trois paradigmes à savoir le jeton, le temps et le surplus [Gershwin, 2000]. Ces

trois concepts permettent de distinguer les politiques de pilotage en flux tirés, en flux poussés et en flux hybrides. Dans ce paragraphe, pour des raisons de clarté, ces trois politiques de pilotage sont illustrées sur un module de production élémentaire. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter les références [Deshpande, 1999 ; Gershwin, 2000 ; Gzouli, 2000 ; Levantesi, 2001].

5.1.1. Pilotage à base de jetons

Le principe d'un pilotage à base de jetons, fondé sur l'acquisition et la libération de jetons, est illustré à travers un module de production élémentaire $MP(i)$ sur la Figure 2.7. Le module de contrôle $MC(i)$ qui a pour objectif de piloter le module de production est virtuellement constitué :

- d'une machine M_D supposée parfaitement fiable et travaillant avec un taux de demande d . Elle a pour rôle de générer un jeton représentant le processus d'arrivée d'une demande,
- d'une machine de synchronisation S_i infiniment rapide et parfaitement fiable,
- d'un premier stock de jetons SD_i supposé de capacité infinie et assimilé au stock de demande,
- d'un deuxième stock de jetons SP_i supposé de capacité équivalente à un stock minimum spécifié au sens de la gestion en flux tirés. Il est assimilé au stock de production de la machine M_i .

A la fin d'une opération sur la machine M_i , le produit est déposé dans son stock de sortie B_i si ce dernier n'est pas saturé. Instantanément, un jeton est créé dans le stock SP_i (si également celui-ci n'est pas saturé). Ainsi, dès qu'une demande arrive, la machine M_D génère un jeton dans le stock SD_i qui est immédiatement synchronisé par la machine S_i avec celui déjà créé dans SP_i . Cette opération matérialise le départ d'un produit fini du stock B_i , ce qui donne lieu à un nouveau lancement de production (commande locale). Autrement dit, un produit du stock d'entrée B_i est autorisé à être chargé sur la machine M_i . Dans le cas où le stock de jetons SP_i est vide à l'arrivée d'une demande, celle-ci est alors mise en attente jusqu'à la génération d'un jeton dans SP_i . D'une manière générale, la machine S_i a un rôle de synchronisation entre la production de la machine M_i et les demandes générées par la machine M_D .

Le stock SP_i du module de contrôle $MC(i)$ permet d'évaluer localement l'avance par rapport à la demande. Inversement, le stock SD_i permet d'évaluer le retard par rapport à cette dernière (demande).

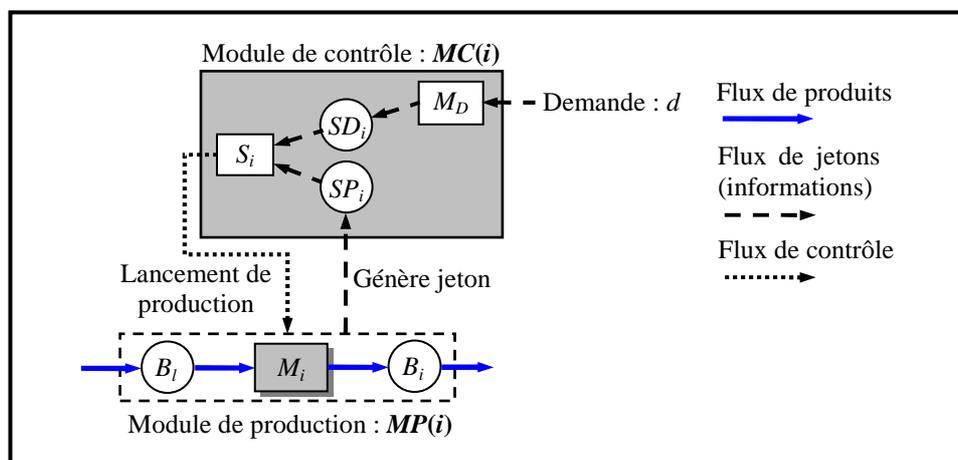


Figure 2.7 : Pilotage à base de jetons d'un module de production $MP(i)$.

Dans cette problématique de pilotage, il est clair que les informations manipulées ne tiennent pas compte de la dimension temporelle. En effet, l'action de lancement de la production ne dépend pas des informations temporelles actuelles (instants d'arrivée) et/ou prévisionnelles (dates d'exigibilité). Autrement dit, l'action dépend uniquement de l'arrivée d'une demande et de la disponibilité d'un produit fini en sortie. De plus, la gestion des incertitudes telles que les pannes n'est pas définie explicitement dans la mesure où les stocks minimaux ne sont généralement pas fixés sur la base des aléas de fonctionnement.

Le déploiement de cette méthodologie de pilotage dans le milieu industriel a donné lieu à des politiques incluant les systèmes Kanban, Kanban généralisé [Di Mascolo, 1990], Kanban étendu (Extended Kanban) [Dallery and Liberopoulos, 2000], Production Authorization Card [Buzactt and Shanthikumar, 1993] et CONWIP (CONstant Work In Progress) [Spearman et al., 1990].

5.1.2. Pilotage à base de temps

Le pilotage à base de temps opère à partir de prévisions sur la disponibilité des ressources et des produits. Il utilise le statut de ces derniers en relation avec leurs dates d'arrivée, dates d'exigibilité ou encore leurs degrés de priorité pour élaborer les actions de pilotage.

Pour un module de production $MP(i)$, le module de contrôle à base de temps $MC(i)$ consiste à décider du lancement de la production à partir (Cf. Figure 2.8) :

- de la date d'exigibilité $DD_i(t)$ (due date) de la production actuelle $y_i(t)$ en fonction de sa demande prévisionnelle d .
- de l'estimation de l'avance en production (earliness) $\varepsilon_i(t) = DD_i(t) - t$ à l'instant t sur le module $MP(i)$.

À partir de ces estimations, si une production est disponible dans le stock d'entrée B_i et si le stock de sortie B_i n'est pas saturé alors un lancement est effectué dès que l'avance en production actuelle $\varepsilon_i(t)$ devient inférieure à une durée « au plus tôt » spécifiée par rapport à sa date d'exigibilité. Cette durée « au plus tôt » tient compte, en plus du temps de traitement, des possibilités de pannes ainsi que des coûts de rupture et de stockage.

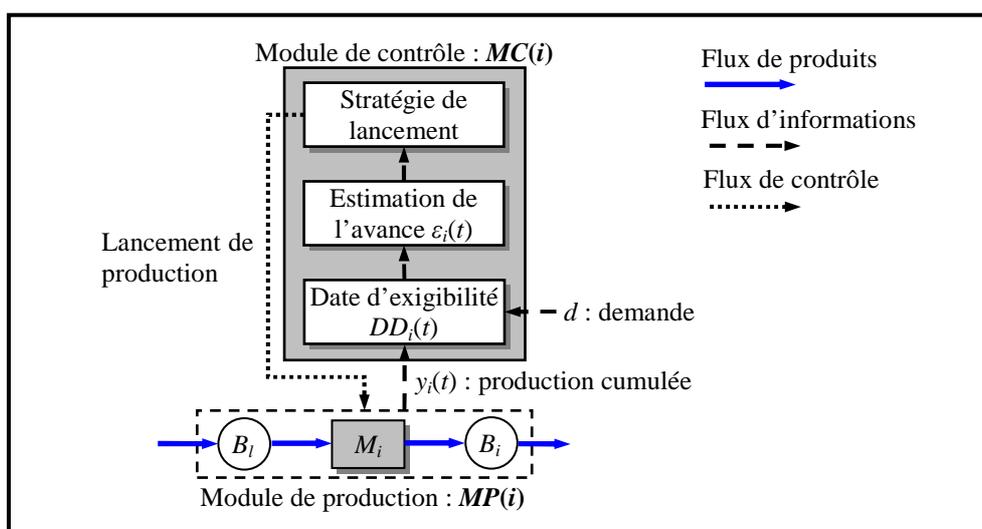


Figure 2.8 : Pilotage à base de temps d'un module de production $MP(i)$.

A la différence de la politique de pilotage à base de jetons, cette méthodologie est essentiellement dictée par la dimension temporelle de l'information manipulée. En effet, la qualité des services exprimée en termes de satisfaction des délais de livraison prime sur les performances du système en termes d'encours par exemple. De plus, une gestion à base de temps se traduit souvent par des problèmes d'ordonnancement difficiles à résoudre, particulièrement dans le contexte de systèmes à « gros volumes » de produits.

Dans ce cadre, nous citons des exemples pratiques de pilotage à base de temps incluant les systèmes MRP¹ dans une démarche de pilotage à court et à moyen termes. De la même manière, pour un pilotage en temps réel, on peut citer les règles de priorité pour la gestion des stocks telles que FIFO², SPT³, EDD⁴, LS⁵, etc.

5.1.3. Pilotage à base de surplus

Dans le pilotage à base de surplus (Cf. Figure 2.9), les actions sont élaborées sur la base de la différence entre la production et la demande cumulées. Cette différence constitue un stock lorsqu'elle est positive (avance sur la production désirée) ou une rupture de stock lorsqu'elle est négative (un retard sur la production désirée). Il s'agit typiquement d'un problème de suivi de trajectoire analogue à ceux traités en automatique continue où l'objectif est de piloter la sortie afin de suivre la trajectoire de la demande.

Dans ce contexte, le pilotage à base de surplus peut être interprété selon les deux modes de pilotage à base de jetons et à base de temps [Gershwin, 2000]. En effet, la vision à base de temps se situe dans la possibilité de donner une estimation de la marge de production nécessaire à partir de demandes prévisionnelles. Cette marge qui a pour objectif d'absorber les aléas de fonctionnement (pannes) permet d'éviter les phénomènes de rupture et de blocage. Dans ce contexte, les flux traversant le module de production sont régulés en choisissant le taux de production approprié. Le pilotage est alors essentiellement dicté par la demande réelle et la production courante dont la différence représente le surplus. Ce dernier peut être évalué soit :

- localement au niveau de chaque module de production élémentaire : surplus local,
- globalement à la sortie du système : surplus final.

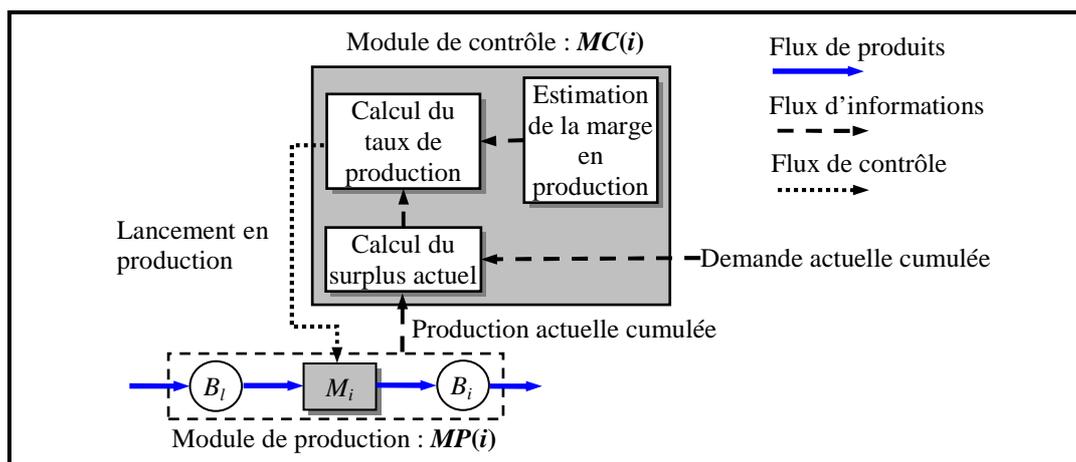


Figure 2.9 : Pilotage à base du surplus d'un module de production $MP(i)$.

¹ MRP : Material Requirement Planning, Planification des Ressources de Production.

² FIFO: First In First Out, premier arrivé premier servi.

³ SPT : Shortest Processing Time ou temps de traitement le plus court.

⁴ EDD : Earliest Due Date ou date d'exigibilité la plus proche.

⁵ LS : Least Slack, la marge la plus courte.

Les propriétés majeures qui ont motivé notre choix dans l'adoption d'une stratégie de pilotage à base du surplus sont :

- une meilleure robustesse de la commande locale vis-à-vis des perturbations aléatoires que peut subir le système,
- la possibilité de synthèse d'une commande locale sous forme de problème de régulation et/ou de suivi de trajectoire où l'arsenal mathématique de l'automatique continue peut être exploité pour exhiber d'intéressantes propriétés telles que la stabilité, la contrôlabilité et la faisabilité,
- la possibilité de hiérarchiser le problème de pilotage pour des systèmes de larges dimensions dans l'optique de la supervision à travers les notions du surplus local et final.

Un exemple de politique de contrôle à base de surplus, souvent étudiée dans la littérature, est la politique du point d'hésitation (hedging point policy) [Kimemia and Gershwin, 1983 ; Gershwin, 1994].

La classification des systèmes de pilotage des flux abordée dans cette section est résumée sur la Figure 2.10.

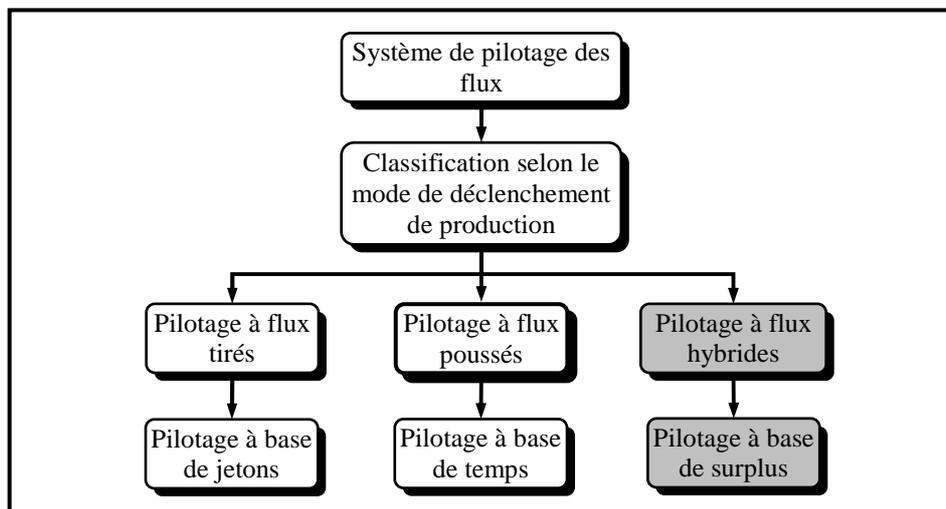


Figure 2.10 : Classification des systèmes de pilotage des flux.

5.2. Pilotage conventionnel à base de surplus

Dans un système de production, le pilotage à base de surplus implique essentiellement la résolution de trois types de problèmes liés à la nature dynamique et complexe des interactions entre les flux, à savoir [Gunasekaran et al., 1995 ; Dilts et al., 1991] :

- la sélection des produits à traiter par le module de production : il s'agit de sélectionner et de travailler sur le flux des produits pour lequel la performance du surplus est la moins satisfaisante (le flux qui accuse le plus de retard par rapport à la demande),
- le séquençage des opérations : qui consiste à isoler, en fonction du surplus, les différents flux correspondant aux différentes opérations exécutées sur chaque module de production élémentaire,
- l'allocation de capacité de production : cette action vise à déterminer les taux de production de chaque type de produit sur les modules élémentaires afin de réguler les flux dans le système. L'objectif étant de minimiser les coûts de stockage et de rupture de stocks sur l'horizon de production considéré.

Dans notre démarche de pilotage à base de surplus, nous nous intéressons au problème d'allocation de capacité de production. Dans ce cas, notre objectif consiste à chercher, pour chaque module de production élémentaire, le taux de production minimisant le coût total en temps passé en rupture (surplus négatif) et en stockage (surplus positif) [Kimemia and Gershwin, 1983 ; Akella and Kumar, 1986 ; Bielecki and Kumar, 1988 ; Gershwin, 1989, 1994 ; Srivatsan, 1993 ; Maimon et al., 1998 ; Feng and Xiao, 2002]. En supposant que leurs coûts unitaires respectifs soient fixes, la recherche des taux optimaux consiste à maintenir le surplus proche d'une marge de sécurité spécifiée. Dans ce cas, le problème d'allocation de capacité revient à calculer les taux de production capables d'assurer un bon suivi de trajectoire.

Afin d'expliquer la démarche de synthèse à base du surplus et définir les variables nécessaires à l'élaboration de la commande locale, cette dernière est déclinée sur un module de production élémentaire pris isolément, puis en interaction avec d'autres modules placés en amont et en aval.

5.2.1. Pilotage d'un module de production isolément

Considérons un module de production (module de transformation) $MP(i)$, pris isolément, composé d'une machine non fiable M_i , de son stock d'entrée B_i et de son stock de sortie B_i (Cf. Figure 2.11).

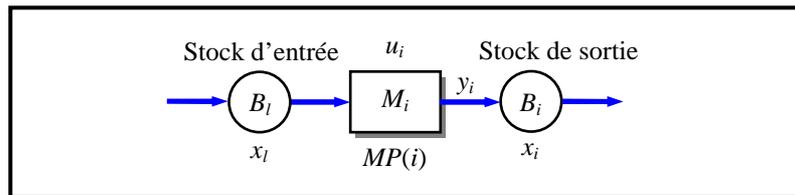


Figure 2.11 : Cas d'un module de production $MP(i)$ pris en isolation.

La capacité du stock de sortie est supposée infinie. Soit d le taux de demande supposé constant, $u_i(t)$ le taux de production instantané de la machine M_i et $u_i^{\max} = 1/\tau_i$ son taux de production maximum (capacité maximale de M_i), avec τ_i le temps opératoire sur M_i . Nous définissons le surplus local $s_i(t)$ sur l'intervalle $[0, t]$ par la différence entre la production $y_i(t)$ et la demande cumulées, c'est-à-dire :

$$s_i(t) = y_i(t) - d \cdot t \quad (2.1)$$

Dans ce cas, la dynamique du surplus peut s'exprimer comme suit :

$$\dot{s}_i(t) = \dot{y}_i(t) - d = u_i(t) - d \quad (2.2)$$

Un surplus négatif signifie un retard sur la production désirée, tandis qu'une valeur positive élevée du surplus indique un excédent de production. Ces deux cas sont indésirables et conduisent à des phénomènes de rupture et de blocage. L'un des objectifs de la commande locale est alors de fixer le taux de production de sorte à maintenir le surplus proche d'une valeur raisonnable (marge de sécurité) tout en évitant les situations de rupture et de blocage.

Etant donnée que la capacité maximale d'un module est supposée constante, la loi de commande peut être vue comme une fraction de la capacité maximale allouée. Ainsi, le taux de production $u_i(t)$ en fonction de la commande, noté $r_i(t)$, s'exprime comme suit :

$$u_i(t) = r_i(t)u_i^{\max} = \frac{r_i(t)}{\tau_i}, \text{ avec } r_i(t) \in [0, 1] \quad (2.3)$$

Le principe de pilotage à base de surplus est illustré sur la Figure 2.12. A partir de l'erreur entre la sortie (production) et la demande cumulée, le module de contrôle local $MC(i)$ a pour objectif d'élaborer la commande $r_i(t)$ afin d'amener la sortie à suivre la demande désirée (problème de suivi de trajectoire).

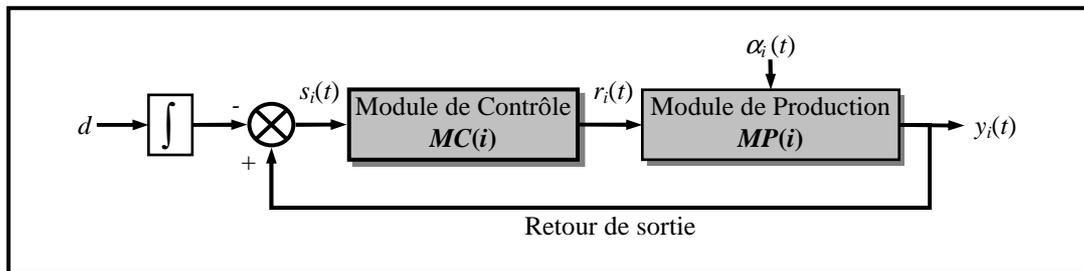


Figure 2.12 : Structure de la commande locale d'un $MP(i)$ pris en isolation.

Dans ce contexte, le concept de pilotage à base de surplus a été initié par Kimemia et Gershwin [Kimemia and Gershwin, 1983]. Ils ont élaboré une forme de commande optimale autour d'un seuil critique appelé point d'hésitation (hedging point) en s'appuyant sur des outils tels que la programmation dynamique [Akella and Kumar, 1986 ; Bielecki and Kumar, 1988]. L'idée de base consiste à fixer, à partir de la connaissance sur les perturbations que peut subir le système (pannes, ruptures et blocages), une marge sur la production au-dessus de la demande prévue [Bai and Gershwin, 1994, 1995]. Cette marge de sécurité permet d'absorber les pertes liées aux aléas rencontrés durant le fonctionnement du système (les pannes des machines par exemple).

La politique de contrôle par point d'hésitation montre que pour un module de production $MP(i)$ pris en isolation et en état de fonctionnement ($\alpha_i(t) = 1$), il existe une valeur critique z_i (valeur du point d'hésitation) pour lequel la loi de commande donnée par l'expression suivante :

$$r_i(t) = \begin{cases} 0 & , \text{ si } s_i(t) > z_i \\ d/u_i^{\max} & , \text{ si } s_i(t) = z_i \\ 1 & , \text{ si } s_i(t) < z_i \end{cases} \quad (2.4)$$

est optimale [Bielecki and Kumar, 1988].

Une illustration de l'évolution de la production cumulée par rapport à la demande par cette méthodologie de pilotage est donnée sur la Figure 2.13.

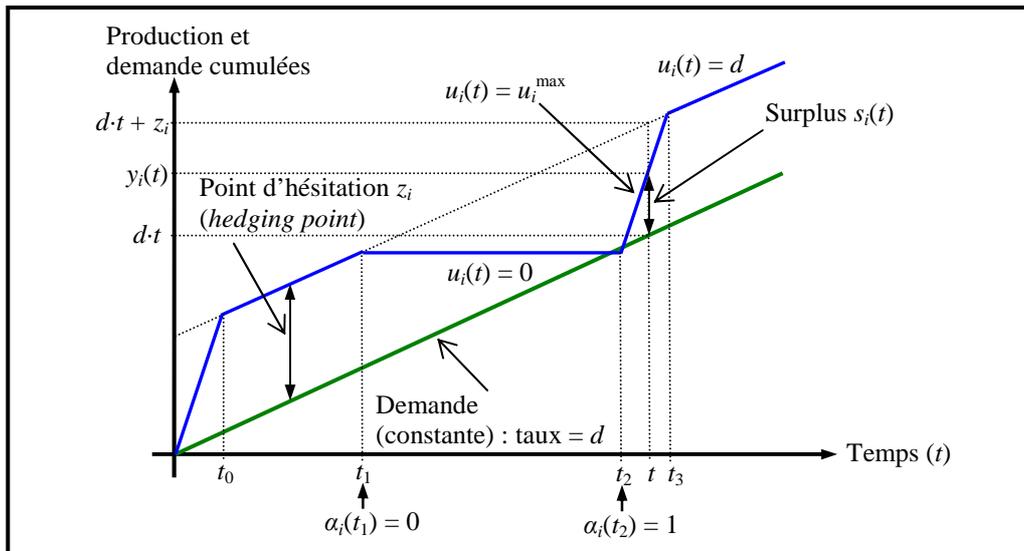


Figure 2.13 : Comportement dynamique de la politique du point d'hésitation d'un $MP(i)$.

Lors d'une panne de la machine M_i , $r_i(t) = 0$, la production reste constante (intervalle $[t_1, t_2]$). Pendant la période de disponibilité de M_i , si le surplus $s_i(t)$ est en dessous du seuil z_i , $r_i(t)$ est fixé à 1 (soit un taux de production maximale u_i^{\max} sur l'intervalle $[t_2, t_3]$). Enfin, lorsque la machine est opérationnelle et que le surplus $s_i(t)$ atteint le seuil z_i , $r_i(t) = d/u_i^{\max}$. Autrement dit, le taux de production $u_i(t)$ suit son taux de demande d (intervalle $[t_0, t_1]$).

Si cette méthodologie de contrôle présente l'avantage d'être simple, stable et optimale par rapport au coût total de rupture et de stockage, elle présente cependant quelques inconvénients. Nous en citons :

- La présence de phénomènes de pompage liés aux commutations franches des taux de production restreintes aux valeurs : maximale, taux de demande et nulle.
- La restriction à la seule information explicite du surplus local du module piloté, ce qui rend sa généralisation et son application difficiles pour un système de production en présence d'une interconnexion de plusieurs modules élémentaires.

5.2.2. Pilotage d'un module de production en interaction

Considérons dans un premier temps le module de production $MP(i)$ en interaction avec un autre module $MP(j)$ placé en aval (Cf. Figure 2.14).

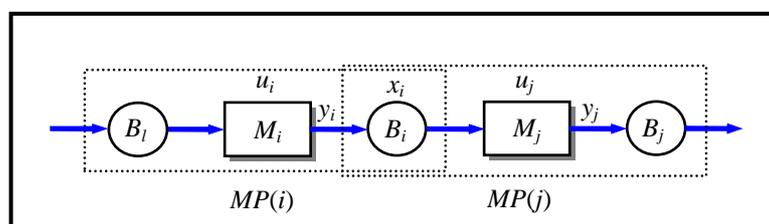


Figure 2.14 : Cas de deux modules de production en interaction.

Dans ce contexte, il a été démontré dans [Gershwin, 2000] que l'expression générale de la commande optimale donnée dans le cas d'un seul module (Cf. équation (2.4)) reste valable. La seule différence réside dans la prise en compte de la contrainte de la capacité maximale du stock intermédiaire. En effet, contrairement au cas précédent, la synthèse de la commande $r_i(t)$ ne dépendra pas uniquement de l'information sur le surplus mais aussi de l'état du stock

intermédiaire $x_i(t)$. Dans ce cas, la commande optimale (2.4) est reformulée par l'expression suivante [Van Rysin et al., 1993 ; Gershwin, 2000] :

$$r_i(t) = \begin{cases} 0 & , \text{si } s_i(t) > z_i \\ d/u_i^{\max} & , \text{si } s_i(t) = z_i \\ r_i^*(t) & , \text{si } s_i(t) < z_i \end{cases} \quad (2.5)$$

où $r_i^*(t)$ s'exprime comme suit :

$$r_i^*(t) = \begin{cases} 1 & , \text{si } 0 \leq x_i(t) < x_i^{\max} \\ 0 & , \text{si } x_i(t) = x_i^{\max} \end{cases} \quad (2.6)$$

La structure de la commande locale correspondante est alors illustrée sur la Figure 2.15 où le module de contrôle local $MC(i)$ dépendra des informations du surplus $s_i(t)$ et du niveau de stock intermédiaire $x_i(t)$. Ce dernier nous renseigne sur l'état de blocage du module.

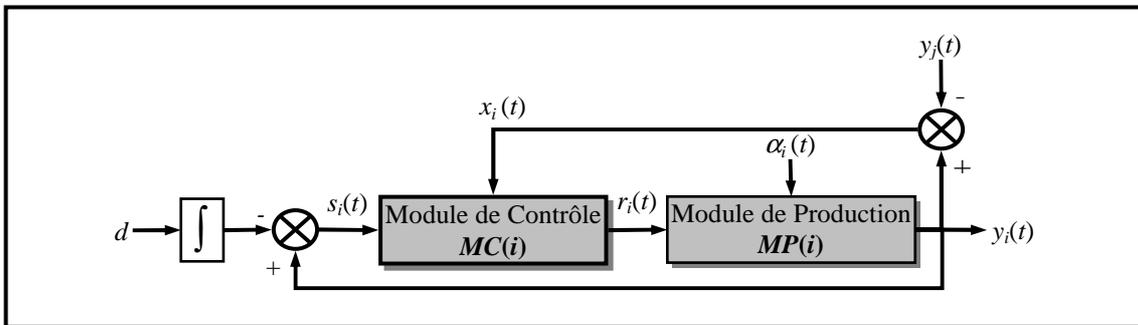


Figure 2.15 : Structure de la commande locale de $MP(i)$ en interaction avec le module en aval $MP(j)$.

Afin de pouvoir prendre en compte toutes les interactions qui agissent sur le module $MP(i)$, en plus du module $MP(j)$ placé en aval, nous nous intéressons maintenant à l'influence du module $MP(l)$ placé en amont du module $MP(i)$ (Cf. Figure 2.16).

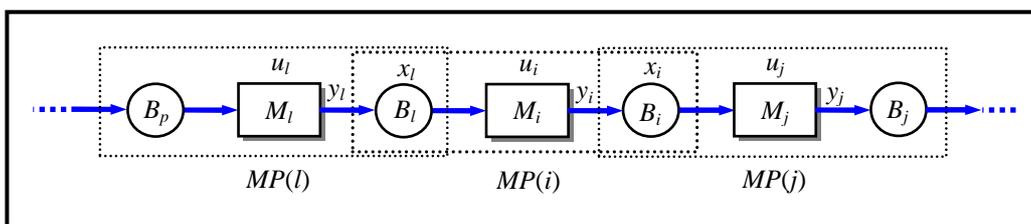


Figure 2.16 : Influence de l'interconnexion des modules de production.

Dans ce cas, la synthèse de la commande $r_i(t)$ dépendra en plus de l'information sur le surplus et le niveau de stock intermédiaire placé en aval, de l'information sur le stock intermédiaire $x_i(t)$ placé en amont. Ce dernier nous renseigne sur l'état de rupture du module.

En présence de l'information $x_i(t)$, seul le terme $r_i^*(t)$ est reformulé dans l'expression de la commande (2.5) :

$$r_i^*(t) = \begin{cases} 1 & , \text{si } 0 \leq x_i(t) < x_i^{\max} \\ 0 & , \text{si } x_i(t) = x_i^{\max} \text{ ou } x_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

La structure de la commande locale dans ce cas est donnée selon la Figure 2.17.

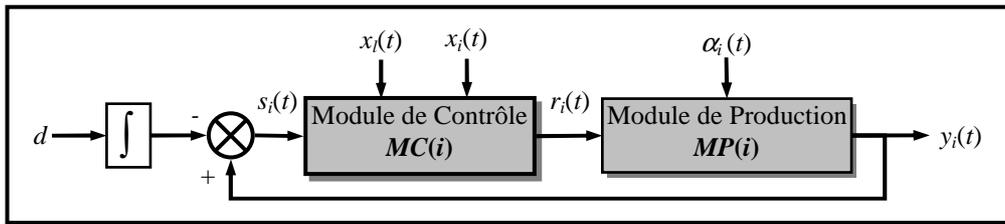


Figure 2.17 : Structure de la commande locale d'un $MP(i)$ en interaction.

5.2.3. Pilotage d'un système de production à N -modules élémentaires

En considérant l'ensemble d'une ligne de transformation à N modules de production $MP(i)$, l'architecture de pilotage est donnée par la Figure 2.18. Cette structure est de type distribuée et modulaire où la succession des modules est volontairement séquentielle pour des raisons de simplicité dans la représentation.

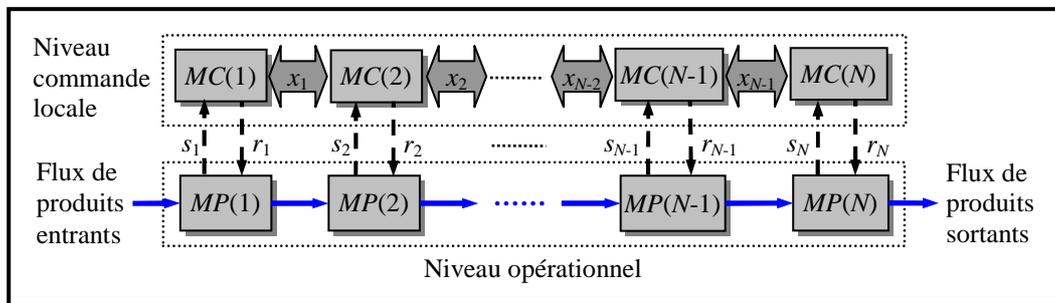


Figure 2.18 : Structure de pilotage au niveau commande locale.

D'une manière simplifiée, en situation de rupture ou de blocage sur le module $MP(i)$ (Cf. Figure 2.16), son taux de production $u_i(t)$ est nul (Cf. équation (2.7)). Sachant que la ligne de transformation n'est pas nécessairement homogène, le déploiement de cette stratégie de pilotage sur toute la ligne nécessite une révision afin de pouvoir prendre en considération sa dynamique globale. En effet, supposons que le stock d'entrée B_i de $MP(i)$ est vide, alors dès qu'un flux de production est poussé par le module en amont $MP(l)$ dans ce stock, il est instantanément traité par $MP(i)$ avec un taux de production $u_i(t) = \min(u_i^{\max}, u_l(t))$ (soit la commande $r_i(t) = \min(1, r_l(t))$). Autrement dit, $MP(i)$ ne peut produire plus rapidement que le module en amont $MP(l)$ pour cause de rupture. De la même manière, si le stock de sortie B_i du module $MP(i)$ est saturé, alors dès qu'un flux de production est tiré par le module en aval $MP(j)$, le module $MP(i)$ génère immédiatement un flux dans ce stock avec un taux $u_i(t) = \min(u_i^{\max}, u_j(t))$ (la commande $r_i(t) = \min(1, r_j(t))$). Autrement dit, le module $MP(i)$ ne peut travailler plus rapidement que le module en aval $MP(j)$ pour cause de blocage. En résumé, lors d'un blocage, la cadence de production de $MP(i)$ est dictée par celle du module en aval $MP(j)$, tandis qu'en cas de rupture c'est le module en amont $MP(l)$ qui fixe le taux de production de $MP(i)$ [Gershwin, 2000].

Si cette stratégie de pilotage est théoriquement viable, sa mise en œuvre pratique dans un pilotage temps réel reste néanmoins difficile. En effet, le module de contrôle $MC(i)$ doit disposer au même instant des commandes en cours sur le module en amont $MC(l)$ et le module en aval $MC(j)$, ce qui est irréalisable en pratique. Afin de remédier à ce problème, Bai et Gershwin [Bai and Gershwin, 1994, 1995] ont proposé une approche par retour d'états (le

vecteur du surplus $s(t) = [s_1(t), \dots, s_N(t)]$ pour déterminer les commandes locales $r(t) = [r_1(t), \dots, r_N(t)]$ (les taux de production). La méthode proposée est basée sur un partitionnement de l'espace d'état de la variable du surplus en domaines attractifs (domaine d'hésitation) mutuellement exclusifs. Dans chaque domaine, le taux de production $u_i(t)$ d'un module $MP(i)$ reste constant et calculé en fonction du surplus et des perturbations (pannes). Dans ce contexte, un mécanisme de commutation à base d'un seuil par point d'hésitation entre domaines attractifs est utilisé. La synthèse de la commande $r_i(t)$ est alors formalisée par un problème de programmation linéaire comme suit :

$$\min_{r(t)} \left\{ \sum_{i=1}^N (s_i(t) - z_i) \cdot r_i(t) \right\} \quad (2.8)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} 0 \leq r_i(t) \leq \alpha_i(t) \\ \dot{s}_i(t) = r_i(t)u_i^{\max} - d \\ \dot{x}_i(t) = [r_i(t) - r_j(t)]u_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N. \\ 0 \leq x_i(t) \leq x_i^{\max} \end{cases} \quad (2.9)$$

Toutefois, les commutations, en fonction du surplus, dans l'expression de la commande (2.8) induisent un effet de pompage aux points d'hésitation, bien connu en automatique, qui affecte les performances du pilotage [Gershwin, 1994 ; Bai and Gershwin, 1994, 1995 ; Yuniarto and Labib, 2005]. Par ailleurs, l'information sur les niveaux des stocks intermédiaires n'est pas prise en compte explicitement dans la synthèse de la commande.

D'une manière générale, l'élaboration de commande optimale est souvent très difficile pour des systèmes complexes qui font apparaître beaucoup de paramètres. En effet, dans le cadre du pilotage des systèmes à base de surplus, l'obtention d'une solution analytique générale au problème d'optimisation précédent reste difficile, notamment lorsque les paramètres du système sont non-homogènes (différents temps opératoires et taux de pannes par exemple, voir [Martinelli, 2005]) ou en présence d'incertitudes (demande incertaine par exemple, voir [Perkins and Kumar, 2001 ; Chan et al., 2007]).

Afin de remédier aux problèmes cités précédemment, une solution peut être envisagée à partir d'une représentation du comportement du contrôleur exhibant les relations entre les entrées, les sorties et les états par des mécanismes issus de l'intelligence artificielle. En effet, l'intelligence artificielle peut apporter des formulations qui se prêtent plus facilement à des problèmes de pilotage complexes, tels que l'ordonnancement, la planification et la supervision en imitant le raisonnement humain [Grabot, 2001 ; Gentil and Montmain, 2004].

6. Pilotage intelligent à base de surplus

Dans le contexte du pilotage intelligent des systèmes de production, les systèmes experts, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones et les systèmes flous sont de loin les concepts les plus exploités dans la littérature. Dans cette thèse, une attention particulière est donnée aux réseaux de neurones et aux systèmes flous [Narandra and Mukhopadhyay, 1992 ; Passino and Yurkovish, 1998 ; Dreyfus et al., 2004].

6.1. Contrôleurs à base de réseaux de neurones

Les réseaux de neurones servent aujourd'hui dans toutes sortes d'applications et dans divers domaines (pilotage de systèmes, identification, traitement d'images, ...). Un neurone artificiel est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert (linéaire, seuil, sigmoïde, ...) pour produire la sortie du neurone.

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Les neurones de chaque couche sont tous connectés aux entrées. A chaque connexion, un poids représentant son efficacité synaptique est associé. Un poids négatif vient inhiber une entrée, alors qu'un poids positif vient l'accentuer. Pour spécifier la structure du réseau, il faut choisir le nombre de couches, le nombre de neurones sur chaque couche ainsi que le mécanisme d'interconnexion [Dreyfus et al., 2004 ; Narandra and Mukhopadhyay, 1992].

Parmi les propriétés désirables pour un réseau de neurones, la plus fondamentale est sûrement sa capacité d'apprendre de son environnement et d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage. Dans la plupart des architectures, l'apprentissage se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire par un changement des valeurs des poids qui relie les neurones d'une couche à une autre. D'une manière générale, nous disposons d'un ensemble de règles bien définies permettant de réaliser un tel processus d'adaptation des poids. Ces règles constituent ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage du réseau.

La règle la plus simple et la plus utilisée repose sur la correction de l'erreur observée en sortie (entre la sortie et l'objectif désiré). En effet, l'apprentissage par correction des erreurs consiste à minimiser un critère de performance basé sur les signaux d'erreur (souvent sous forme quadratique) dans le but de faire converger les sorties du réseau vers les objectifs désirés.

Dans le contexte de pilotage des flux, des tentatives d'exploitation de la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones sont relatées dans la littérature. Dans ce cadre, des problèmes d'identification et de synthèse d'un contrôleur stable pour l'ordonnancement des tâches, en temps réel, sur des machines ont été étudiés dans [Rovithakis et al., 1997, 1999]. Une illustration de l'applicabilité de l'approche par réseaux de neurones dans le pilotage des flux sur un cas industriel pratique est traité dans [Rovithakis et al., 2001].

D'autres travaux cités dans la littérature ont adopté cette technique pour divers problèmes de pilotage des systèmes manufacturiers. A titre d'exemple, Giedon [Gideon, 1998] exploite les réseaux de neurones dans le contrôle temps réel de diverses opérations dans un système manufacturier (sûreté de fonctionnement des machines, routage des convoyeurs, changement d'outils, partage de robots manipulateurs, etc.). L'auteur propose une architecture multi-couches pour réduire la complexité liée à l'apprentissage du système en phase d'implémentation. De leur côté, Huang et al. [Huang et al., 2000] utilisent les réseaux de neurones pour générer les séquences optimales dans une ligne de désassemblage. Récemment, Chang et al. [Chang et al., 2007] ont appliqué une approche neuronale non supervisée pour contrôler les défauts des composants dans le contexte d'une production de masse de semi-conducteurs. Altiparmak et al. [Altiparmak et al., 2007] montrent l'opportunité des réseaux de neurones pour les problèmes d'allocation d'espace de stockage dans le cas des systèmes d'assemblage asynchrones. Pour plus de détails, un état de l'art récent sur les approches à base de réseaux de neurones traitant des problèmes d'ordonnancement est proposé dans [Akyol and Bayhan, 2007].

Dans le cadre de la problématique de pilotage à base de surplus, une méthodologie d'apprentissage par réseaux de neurones peut être utilisée pour la conception du contrôleur local (Cf. Figure 2.19).

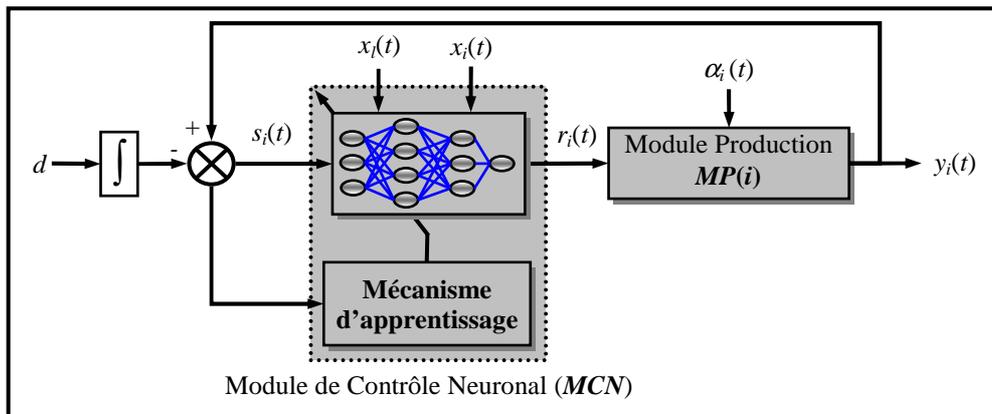


Figure 2.19 : Structure du module de contrôle neuronal.

En effet, pour chaque module de production élémentaire $MP(i)$ et à partir des informations :

- sur les niveaux des stocks intermédiaires $x_i(t)$ et $x_i(t)$,
- l'erreur $s_i(t)$ (surplus local) entre la production $y_i(t)$ et la demande,

il est possible de déterminer, par minimisation de l'erreur $s_i(t)$ via un mécanisme d'adaptation et d'apprentissage, les poids des connexions d'un module de contrôle neuronal (réseau de neurones) assurant de bonnes performances. D'une manière simplifiée, l'expression de ce contrôleur est de la forme suivante :

$$r_i(t) = MCN(x_l(t), x_i(t), s_i(t)) \tag{2.10}$$

où : MCN représente la fonction entrée-sortie du module de contrôle neuronal.

Pour un système de production composé de N modules élémentaires, cette stratégie peut être déployée sur chaque module $MP(i)$ comme illustré sur la Figure 2.20. En effet, selon la décomposition du système, chaque module $MP(i)$ dispose de son propre module de contrôle neuronal $MCN(i)$.

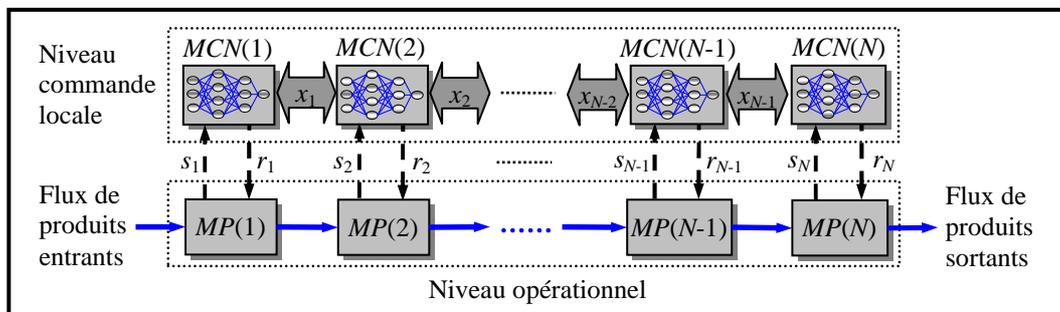


Figure 2.20 : Architecture de contrôle neuronale distribuée.

D'une manière générale, les réseaux de neurones sont des approximateurs universels et ils donnent des performances satisfaisantes. Si leur atout principal réside dans leur capacité

d'apprentissage, leur structure et leurs paramètres n'ont pas toujours des justifications physiques. De plus, la connaissance humaine ne peut pas être exploitée pour les construire.

D'un point de vue implantation, les méthodes de contrôle neuronales ont recours à des techniques numériques qui présentent nécessairement des difficultés inhérentes aux algorithmes itératifs d'adaptation (valeurs d'initialisation, états de convergence, erreurs d'approximation,...) et plus particulièrement dans un schéma distribué où plusieurs dynamiques de convergence des paramètres sont à prendre en considération.

Afin de contourner ces difficultés, d'autres méthodes intelligentes peuvent être exploitées sous l'hypothèse d'une connaissance experte sur le système à piloter. Dans ce cadre, les systèmes flous à base de connaissance peuvent être utilisés. En effet, les systèmes d'inférence flous sont également des approximateurs universels ayant deux points forts par rapport aux réseaux de neurones. D'une part ils sont généralement construits à partir de la connaissance humaine et d'autre part, ils ont une capacité descriptive élevée due à l'utilisation des variables linguistiques. Il est apparu naturel de s'orienter vers une approche floue où le système de pilotage est basé sur un module de contrôle flou.

6.2. Contrôleurs flous

On distingue classiquement deux grandes familles de contrôleurs flous : contrôleurs flous à conclusions symboliques (contrôleurs de Mamdani) [Mamdani, 1974] et contrôleurs flous à conclusions fonctionnelles (contrôleurs flous de Takagi-Sugeno-Kang : TSK) [Takagi and Sugeno, 1985]. Ces deux types de contrôleurs flous sont basés sur une collection de règles « Si ... alors ... ». Dans les deux cas, les prémisses de règles sont exprimées symboliquement. Seule l'expression des conclusions de règles permet alors de dissocier les deux familles de contrôleurs. Ceux de Mamdani utilisent en effet des conclusions symboliques de même nature que les prémisses alors que les contrôleurs TSK exploitent des conclusions numériques.

Les premiers développements des contrôleurs flous ont été initiés par Mamdani [Mamdani, 1974]. L'idée de base consistait à exploiter l'expérience des opérateurs humains pour construire une loi de commande. Un jeu de règles floues traduit alors le comportement des opérateurs en terme de stratégie de commande. Une telle approche permet d'éviter la phase de modélisation nécessaire à la mise en oeuvre des techniques de synthèse de l'automatique conventionnelle. Pour des systèmes complexes et difficiles à modéliser, l'économie du modèle peut s'avérer importante tant en temps qu'en coût.

Dans le contexte des systèmes de production, l'idée d'utiliser des techniques floues pour le pilotage des flux n'est pas nouvelle. En effet, on dispose d'un certain nombre de travaux traitant des problèmes complexes tels que la planification, l'ordonnancement, la supervision et la maintenance. Dans ce cadre, Angsana et Passino [Angsana and Passino, 1994] synthétisent un contrôleur flou pour gérer les priorités sur les stocks d'entrée d'une machine. Dans le même état d'esprit, Custodio et al. [Custodio et al., 1994] proposent une version floue de l'approche de pilotage développée dans [Gershwin, 1989] où l'objectif est de suivre au plus près une trajectoire de demande tout en maintenant un niveau d'encours bas. Dans Ghabri [Ghabri, 1995] une approche floue hiérarchique pour modéliser et commander des systèmes flexibles à forte densité de produits est proposée. Dans les articles [Zhang and Phillis, 1999 ; Zhang et al., 2005], les auteurs étudient le potentiel d'application des systèmes flous pour une variété de problèmes liés au pilotage des flux via la théorie des files d'attente. Monfared et Steiner [Monfared and Steiner, 2000] proposent une stratégie de pilotage intégrant un ordonnancement adaptatif pour des systèmes flexibles automatisés en se basant sur des

concepts de la théorie des sous-ensembles flous. L'approche permet de détecter dynamiquement les changements sur l'arrivée des produits et d'ajuster en conséquence les paramètres de la politique de contrôle adoptée. A partir des données de maintenance (fréquence des pannes) et de la production requise, Sudiarmo et Labib [Sudiarmo and Labib, 2002] développent un contrôleur flou pour fixer le temps d'inter-arrivée des produits afin d'optimiser l'ordonnancement des tâches dans le système. Une revue des approches existantes sur des problèmes d'ordonnancement via la théorie des sous-ensembles flous est donnée dans [Dubois et al., 2003].

Parmi les travaux qui concernent notre problématique, on peut citer ceux de Yuniarto et Labib [Yuniarto and Labib, 2005] qui proposent une version floue de la politique du point d'hésitation de Gershwin [Gershwin, 1994] pour contrôler les flux d'une machine mono-produit non-fiable. Les auteurs justifient l'utilisation d'un contrôleur flou par l'atténuation des effets de pompage dus aux commutations franches de la politique du point d'hésitation. Dans [Tsourveloudis et al., 2000] les auteurs développent une structure de pilotage floue distribuée sur chaque ressource d'un système de production. Pour chaque ressource élémentaire, ils développent un contrôleur flou exploitant l'encours, le retard sur le délai de fabrication et le temps de production pour réguler les flux de matières dans le système. C'est cette dernière approche qui est la plus proche de la philosophie de pilotage adoptée dans cette thèse, où chaque module de production élémentaire $MP(i)$ est piloté par un module de contrôle flou $MCF(i)$ sur la base des informations du surplus local et des niveaux de stocks intermédiaires.

Dans ce contexte, la problématique du contrôle flou local est déclinée comme suit :

Etant donné un module de production élémentaire $MP(i)$, le problème revient à synthétiser un (module) contrôle flou $MCF(i)$ qui soit capable, à partir des informations sur le surplus local $s_i(t)$ et les niveaux des stocks intermédiaires $x_i(t)$ et $x_i(t)$ de fixer la commande $r_i(t)$ (taux de production $u_i(t)$) régulant la production $y_i(t)$ de la machine M_i afin de l'amener à suivre une demande de taux d et ce en dépit des aléas de fonctionnement (Cf. Figure 2.21).

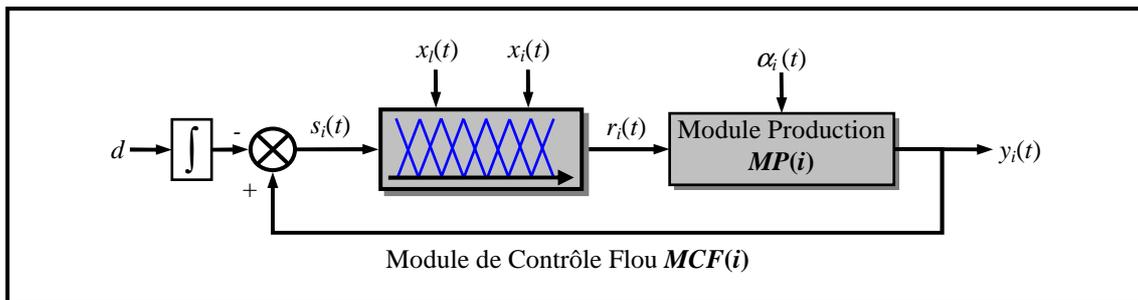


Figure 2.21 : Structure du module de contrôle flou.

D'une manière simplifiée, l'expression de la sortie du module de contrôle flou est donnée par l'équation suivante :

$$r_i(t) = MCF(s_i(t), x_i(t), x_i(t)) = \psi_i(s_i(t), x_i(t), x_i(t)) \quad (2.11)$$

où : ψ_i représente la fonction entrée-sortie du module de contrôle flou.

La fonction entrée-sortie ψ_i est le résultat de l'agrégation d'un ensemble de règles représentant le fonctionnement du module de contrôle $MCF(i)$. La synthèse de cette fonction entrée-sortie est envisagée par deux types de contrôleurs flous, à savoir les contrôleurs de

Mamdani et ceux de Sugeno. Nous revenons sur ce point dans la section suivante où le mécanisme de calcul associé à chaque contrôleur est détaillé. Dans le cadre d'un système de production à N modules élémentaires, comme illustré sur la Figure 2.22, chaque module $MP(i)$ est piloté par un module de contrôle flou $MCF(i)$ aboutissant ainsi à une structure de contrôle flou distribuée.

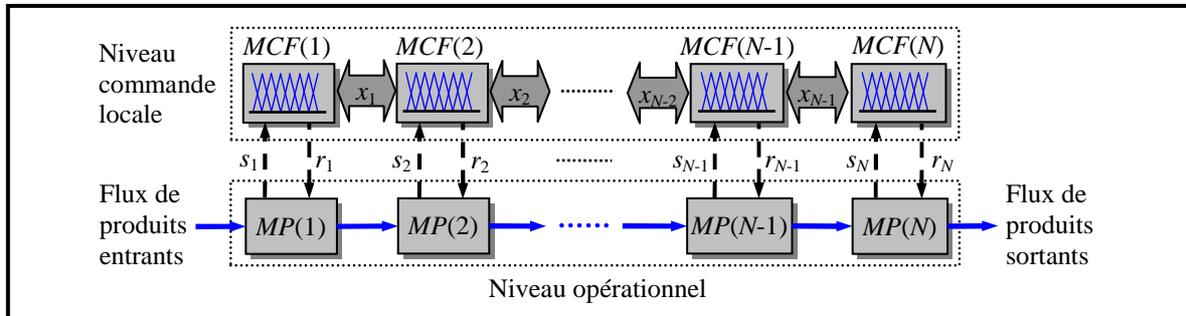


Figure 2.22 : Architecture de contrôle flou distribuée.

7. Stratégie de contrôle flou à base de surplus

Comme discuté précédemment, la synthèse du module de contrôle flou local est envisagée par deux types de formalismes : Mamdani ou Sugeno. Bien qu'ils soient équivalents sous certaines conditions, ils sont dans un premier temps clairement dissociés et traités indépendamment l'un de l'autre. Ce choix est lié au fait que ces deux types de contrôleurs sont généralement exploités dans des contextes différents. En effet, en plus de l'exploitation de l'information experte dans les prémisses, les contrôleurs de Sugeno sont souvent associés à une recherche de performance numérique alors que ceux de Mamdani sont orientés vers une vision purement experte.

Dans ce qui suit, la présentation des deux types de contrôleurs flous est réduite à celle des mécanismes de calcul associés. En effet, l'objectif visé étant simplement la réalisation d'un transfert entrée/sortie numérique connu, nul besoin d'étudier en détail le fonctionnement interne des contrôleurs flous considérés. Enfin, pour alléger les notations, la présentation est restreinte à des systèmes à deux entrées x_1 et x_2 et une sortie r . Ces entrées peuvent représenter les variables $s_i(t)$, $x_i(t)$ ou $x_i(t)$. La variable r représente la sortie du contrôleur flou qui, dans notre contexte, représente la capacité allouée.

7.1. Contrôleurs de type Mamdani

7.1.1. Principe

Supposons un contrôleur flou de type Mamdani avec deux entrées x_1 et x_2 et une sortie r . L'architecture conventionnelle de ce contrôleur est illustrée sur la Figure 2.23 [Mamdani, 1975 ; Lee, 1990a, 1990b].

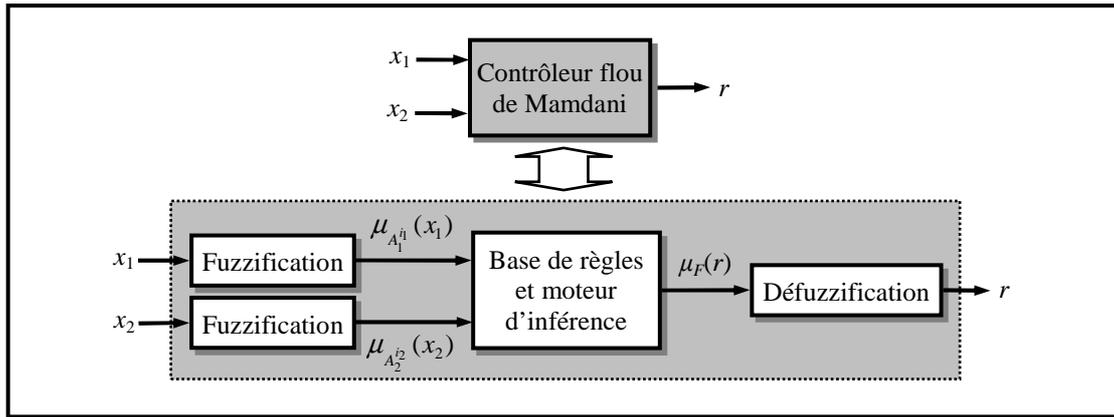


Figure 2.23 : Les étapes d'un contrôleur flou de Mamdani.

Supposons N_1 et N_2 le nombre de symboles (termes) flous possibles pour décrire respectivement x_1 et x_2 tels que $A_1^{i_1}$, $i_1 \in I_1 = \{1, \dots, N_1\}$ et $A_2^{i_2}$, $i_2 \in I_2 = \{1, \dots, N_2\}$. La base de règles complète est alors composée de $N = N_1 \times N_2$ règles. De la même manière, on suppose N_3 symboles flous $A_3^{i_3}$, $i_3 \in I_3 = \{1, \dots, N_3\}$ pour décrire la sortie r .

A travers l'architecture de ce contrôleur, on distingue trois parties : la fuzzification, la base de connaissance (base de règles et moteur d'inférence) et la défuzzification.

1. **La fuzzification** est l'opération qui transforme toute grandeur numérique en une partie floue. D'une façon simplifiée, pour des entrées précises x_1^* et x_2^* , le résultat de la fuzzification est notée respectivement par $\mu_{A_1^{i_1}}(x_1^*)$ et $\mu_{A_2^{i_2}}(x_2^*)$ qui représentent le degré d'appartenance des valeurs numériques x_1^* et x_2^* aux symboles $A_1^{i_1}$ et $A_2^{i_2}$.
2. **La base de connaissances** d'un contrôleur flou peut être considérée comme l'association d'une base de règles et d'un moteur d'inférence. Pour un contrôleur de Mamdani, la base de règles est donnée par une collection de règles de la forme suivante :

$$R^{(i_1, i_2, i_3)} : \text{Si } x_1 \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } x_2 \text{ est } A_2^{i_2} \text{ alors } r \text{ est } A_3^{i_3} \quad (2.12)$$

Le jeu de règles est donné par la connaissance de l'ensemble I des triplets (i_1, i_2, i_3) . Il est dit complet si :

$$\forall (i_1, i_2) \in I_1 \times I_2, \exists i_3 \in I_3 \mid (i_1, i_2, i_3) \in I \quad (2.13)$$

L'inférence consiste à calculer une nouvelle partie floue qui caractérise la sortie du contrôleur à partir de la partie floue issue de la fuzzification. Par exemple, pour des entrées numériques précises x_1^* et x_2^* , un sous-ensemble flou de sortie, noté F , est généré selon la relation :

$$\mu_F(r) = \max_{(i_1, i_2, i_3) \in I} \min(\mu_{A_1^{i_1}}(x_1^*), \mu_{A_2^{i_2}}(x_2^*), \mu_{A_3^{i_3}}(r)) \quad (2.14)$$

L'opération $\max_{(i_1, i_2, i_3) \in I}$ correspond à l'application de l'opérateur max sur l'ensemble des règles définies.

L'équation (2.14) repose sur l'utilisation des opérateurs flous min/max préconisés par Mamdani. Elle peut être généralisée en introduisant des opérateurs quelconques de type T -norme/ T -conorme et devient alors :

$$\mu_F(r) = \perp_{(i_1, i_2, i_3) \in I} T_2(T_1(\mu_{A_1^{i_1}}(x_1^*), \mu_{A_2^{i_2}}(x_2^*)), \mu_{A_3^{i_3}}(r)) \quad (2.15)$$

où T_1 et T_2 représentent des T -normes et \perp une T -conorme. Il est à noter que l'équation (2.15) correspond à une implantation conjonctive du « Si ... alors ... » et que le cas des graphes implicatifs n'est donc pas abordé dans ce document.

3. La défuzzification est l'opération qui transforme la partie floue issue de l'inférence en une grandeur numérique. Cette valeur numérique de sortie est classiquement implantée par la méthode du centre de gravité :

$$r = MAM(x_1^*, x_2^*) = \frac{\int r \cdot \mu_F(r) \cdot dr}{\int \mu_F(r) \cdot dr} \quad (2.16)$$

7.1.2. Illustration

Afin d'illustrer le fonctionnement du contrôleur flou de type Mamdani, nous considérons un système simple à deux entrées x_1 et x_2 représentant les niveaux des stocks d'entrée-sortie d'un module de transformation. La sortie du contrôleur flou r représente la capacité allouée au module pour fixer son taux production. Le niveau des stocks peut être : « Vide », « Normal » ou « Saturé », tandis que la sortie de commande peut être : « Bas », « Moyen » ou « Haut ». A partir de ces descriptions linguistiques, le partitionnement des univers de discours des différentes entrées et de la sortie est défini sur la Figure 2.24. Nous supposons que les valeurs des entrées et de la sortie sont normalisées sur l'intervalle [0, 1].

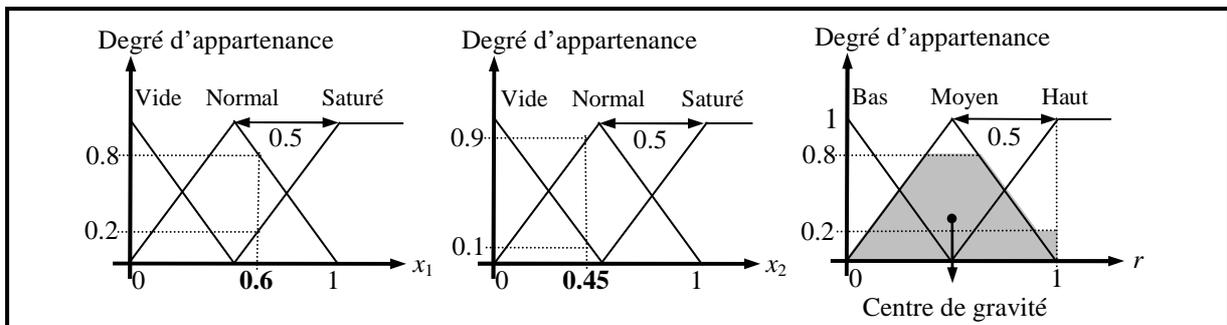


Figure 2.24 : Partitionnement des entrées du module de contrôle flou.

La base de règles (Cf. Tableau 2.1) est construite sur la base d'informations expertes afin d'assurer que le module ait un taux de production capable de maintenir le niveau du stock d'entrée x_1 au dessus du seuil de rupture et le niveau du stock de sortie x_2 en dessous du seuil de blocage.

Tableau 2.1 : Base de règles du contrôleur de Mamdani.

$x_1 \setminus x_2$	Vide (A_1^1)	Normal (A_1^2)	Saturé (A_1^3)
Vide (A_2^1)	Bas (A_3^1)	Bas (A_3^1)	Bas (A_3^1)
Normal (A_2^2)	Haut (A_3^3)	Moyen (A_3^2)	Bas (A_3^1)
Saturé (A_2^3)	Haut (A_3^3)	Haut (A_3^3)	Bas (A_3^1)

Le contrôleur flou de Mamdani est implémenté à l'aide de la librairie Floulib⁶ [Foulloy et al., 2006] sous l'outil Matlab/Simulink (Cf. Figure 2.25). Cette librairie, développée au sein de notre laboratoire, est dédiée à la simulation et à la représentation des systèmes flous numériques et symboliques.

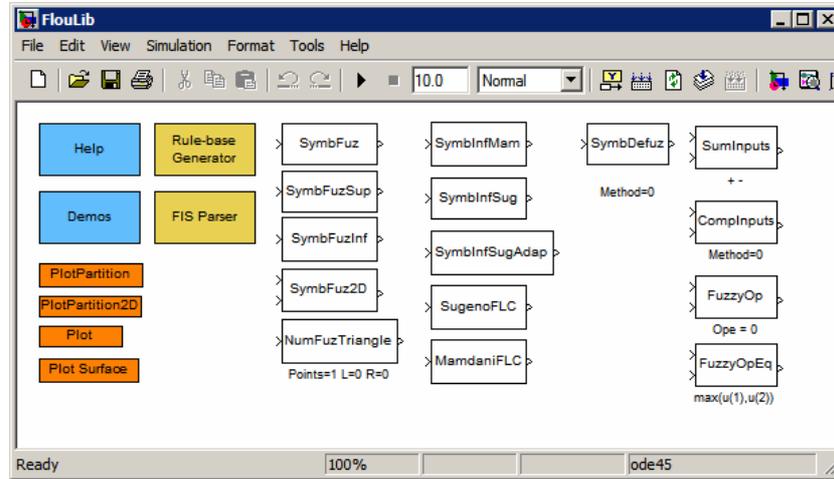


Figure 2.25 : Librairie Floulib.

Nous allons illustrer pour deux valeurs numériques d'entrées $x_1^* = 0.6$ et $x_2^* = 0.45$, le calcul associé pour déterminer la sortie du contrôleur (Cf. Figure 2.24). Pour ces valeurs, les degrés d'appartenance aux termes linguistiques sont donnés par les expressions suivantes :

$$\mu_{A_1^1}(0.6) = 0/\text{Vide} + 0.8/\text{Normal} + 0.2/\text{Saturé} = 0/A_1^1 + 0.8/A_1^2 + 0.2/A_1^3$$

$$\mu_{A_2^2}(0.45) = 0.1/\text{Vide} + 0.9/\text{Normal} + 0/\text{Saturé} = 0.1/A_2^1 + 0.9/A_2^2 + 0/A_2^3$$

Par exemple, la description floue de la valeur $x_1^* = 0.6$ est donnée par 0 par rapport au symbole « Vide », 0.8 par rapport au symbole « Normal » et 0.2 par rapport au symbole « Saturé ». Les règles activées pour ces valeurs des entrées sont (distinguées en gras dans le Tableau 2.1) :

- $R^{(2,1,3)}$: Si x_1 est Normal et x_2 est Vide alors r est Haut,
- $R^{(2,2,2)}$: Si x_1 est Normal et x_2 est Normal alors r est Moyen,
- $R^{(3,1,3)}$: Si x_1 est Saturé et x_2 est Vide alors r est Haut,
- $R^{(3,2,3)}$: Si x_1 est Saturé et x_2 est Normal alors r est Haut,

L'utilisation de l'opérateur *min* pour la combinaison des prémisses et l'opérateur *max* pour l'agrégation des règles donne les partitions floues de sortie suivantes :

- $\mu_{\text{Bas}}(r) = \mu_{A_3^1}(r) = 0$
- $\mu_{\text{Moyen}}(r) = \mu_{A_3^2}(r) = 0.8$
- $\mu_{\text{Haut}}(r) = \mu_{A_3^3}(r) = 0.2$

⁶ Disponible pour téléchargement sur <http://www.listic.univ-savoie.fr>

La forme de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles est montrée en gris sur la Figure 2.24. Finalement, la sortie du contrôleur flou est obtenue après défuzzification par la méthode du centre de gravité exprimée par l'équation (2.16). Soit alors : $r = 0.509$ (Cf. Figure 2.26).

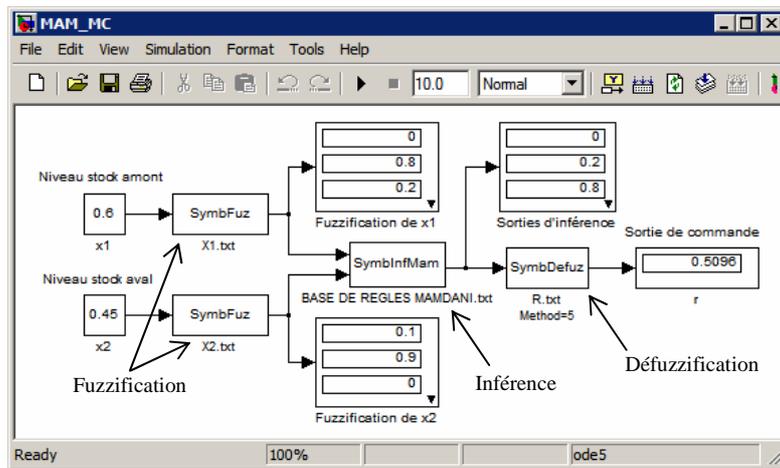


Figure 2.26 : Schéma d'implantation du contrôleur flou de Mamdani à deux entrées avec Floulib.

Il est important d'attirer l'attention du lecteur sur le fait que la sortie d'un contrôleur de Mamdani ne dépend pas uniquement de ses entrées mais aussi du choix des opérateurs d'inférence et de la méthode de défuzzification. Autrement dit, cette sortie n'est pas unique et un choix pertinent de ces paramètres (opérateurs d'inférence et méthode de défuzzification) est à prendre en considération dans la synthèse du contrôleur flou. A titre d'exemple, les surfaces de contrôle associées au contrôleur de Mamdani pour différents choix d'opérateurs d'inférence et de méthodes de défuzzification sont illustrées sur la Figure 2.27.

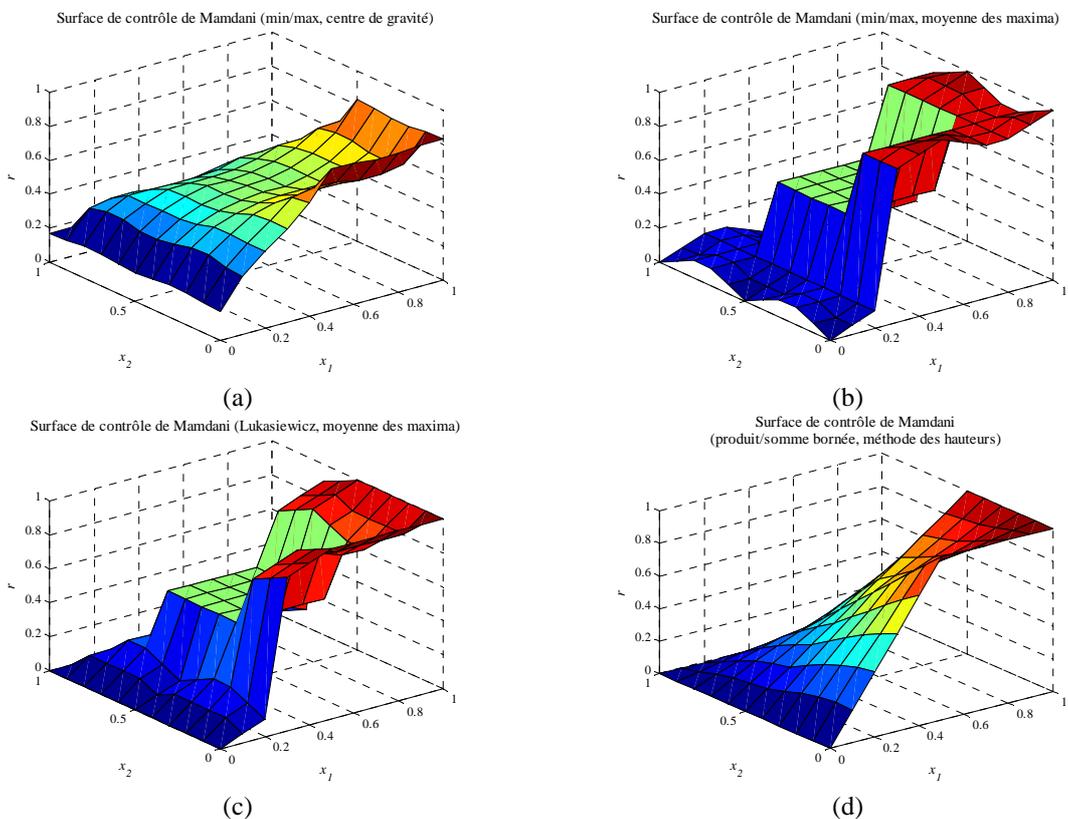


Figure 2.27 : Surfaces du contrôleur flou de Mamdani.

Il apparaît clair sur ces surfaces que la sortie du contrôleur n'est pas unique et les opérateurs d'inférence et les méthodes de défuzzification peuvent introduire des non linéarités non désirables voire parfois non contrôlables.

7.2. Contrôleurs de type Sugeno

Nous traitons ici un cas particulier des contrôleurs TSK, à savoir un contrôleur à conclusion constante souvent appelé contrôleur de Sugeno [Takagi and Sugeno, 1985]. En effet, cette classe de contrôleurs se situe à l'intersection entre un contrôleur de Mamdani et un contrôleur de TSK à conclusion polynomiale. Notre intérêt pour ce type de contrôleurs est suscité par ses différentes caractéristiques, parmi lesquelles on peut citer :

- un nombre restreint de paramètres,
- la disparition de la phase de défuzzification, allégeant de façon importante le mécanisme de calcul global,
- leur position à l'intersection entre les systèmes de Mamdani et TSK permettant d'en avoir une vision linguistique tout en préservant l'aspect numérique,
- contrairement à un contrôleur de Mamdani où les opérateurs min/max peuvent introduire des non linéarités incontrôlables, le système de Sugeno présente une sortie analytique unique sous une forme multi-linéaire par morceaux [Boukezzoula, 2000 ; Boukezzoula et al., 2003 ; Galichet et al., 2004].

D'autres avantages de ces systèmes sont discutés en détails par Sugeno dans [Sugeno, 1999]. C'est ce type de systèmes qui est utilisé dans la suite de cette thèse pour synthétiser la loi de commande locale à base de surplus.

7.2.1. Principe

L'architecture conventionnelle d'un système de Sugeno est illustrée sur la Figure 2.28.

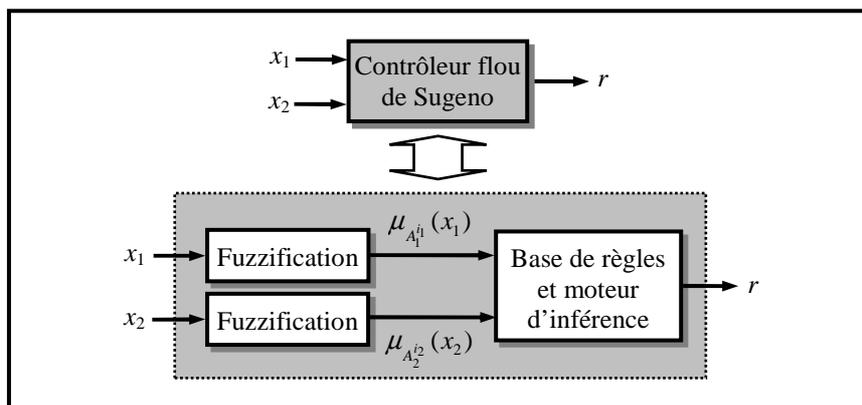


Figure 2.28 : L'architecture d'un contrôleur flou de Sugeno.

Les contrôleurs de Sugeno sont, comme ceux de Mamdani, construits à partir d'une base de règles « Si ... alors ... ». Si les prémisses sont toujours exprimées linguistiquement et donc similaires à celles utilisées dans (2.12), les conclusions sont par contre de nature numérique. Elles peuvent prendre différentes formes : équations linéaires ou polynomiales, statiques ou dynamiques. L'étude est ici restreinte à des conclusions constantes où les règles sont formulées de la manière suivante :

$$R^{(i_1, i_2)} : \text{Si } x_1 \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } x_2 \text{ est } A_2^{i_2} \text{ alors } r = \varphi_{(i_1, i_2)} \quad (2.17)$$

où $\varphi_{(i_1, i_2)}$ représente une valeur réelle quelconque. Pour des valeurs d'entrée précises x_1^* et x_2^* , la sortie r est évaluée selon le mécanisme de calcul suivant :

$$r = \text{SUG}(x_1^*, x_2^*) = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in I^*} \xi_{(i_1, i_2)} \cdot \varphi_{(i_1, i_2)}}{\sum_{(i_1, i_2) \in I^*} \xi_{(i_1, i_2)}} \quad (2.18)$$

avec $\xi_{(i_1, i_2)} = \mu_{A_1^{i_1}}(x_1^*) \cdot \mu_{A_2^{i_2}}(x_2^*)$ et $I^* = I_1 \times I_2$. Pour un partitionnement strict des univers de discours des entrées, on a :

$$\sum_{(i_1, i_2) \in I^*} \xi_{(i_1, i_2)} = 1 \quad (2.19)$$

7.2.2. Illustration

Nous reprenons le même exemple traité précédemment où les mêmes symboles et les mêmes partitions seront exploités ici. La seule différence réside dans l'expression des conclusions des règles. En effet, les conclusions des règles sont numériques et sont données dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Base de règles du contrôleur de Sugeno.

$x_1 \setminus x_2$	Vide (A_2^1)	Normal (A_2^2)	Saturé (A_2^3)
Vide (A_1^1)	0	0	0
Normal (A_1^2)	1	0.5	0
Saturé (A_1^3)	1	1	0

Dans cet exemple, les conclusions numériques sont tout simplement choisies comme les valeurs modales des symboles de sortie du contrôleur de Mamdani. D'une manière générale, ces conclusions sont souvent initialisées par des experts et affinées par la suite à travers des méthodes d'identification telles que les moindres carrés et leurs variétés.

Dans ce cas, pour les entrées numériques $x_1^* = 0.6$ et $x_2^* = 0.45$, la sortie r déterminée selon (2.18) est exprimée comme suit :

$$r = \frac{\xi_{(2,1)} \cdot \varphi_{(2,1)} + \xi_{(2,2)} \cdot \varphi_{(2,2)} + \xi_{(3,1)} \cdot \varphi_{(3,1)} + \xi_{(3,2)} \cdot \varphi_{(3,2)}}{\xi_{(2,1)} + \xi_{(2,2)} + \xi_{(3,1)} + \xi_{(3,2)}}$$

avec :

- $\xi_{(2,1)} = \mu_{\text{Normal}}(0.6) \cdot \mu_{\text{Vide}}(0.45) = 0.8 \cdot 0.1 = 0.08$
- $\xi_{(2,2)} = \mu_{\text{Normal}}(0.6) \cdot \mu_{\text{Normal}}(0.45) = 0.8 \cdot 0.9 = 0.72$
- $\xi_{(3,1)} = \mu_{\text{Saturé}}(0.6) \cdot \mu_{\text{Vide}}(0.45) = 0.2 \cdot 0.1 = 0.02$
- $\xi_{(3,2)} = \mu_{\text{Saturé}}(0.6) \cdot \mu_{\text{Normal}}(0.45) = 0.2 \cdot 0.9 = 0.18$

et : $\varphi_{(2,1)} = \varphi_{(3,1)} = \varphi_{(3,2)} = 1$, $\varphi_{(2,2)} = 0.5$.

Finalement la commande générée par la contrôleur de Sugeno est : $r = 0.64$.

La Figure 2.29 montre l'implantation de ce contrôleur de Sugeno à l'aide de la librairie Floulib à travers un schéma Simulink.

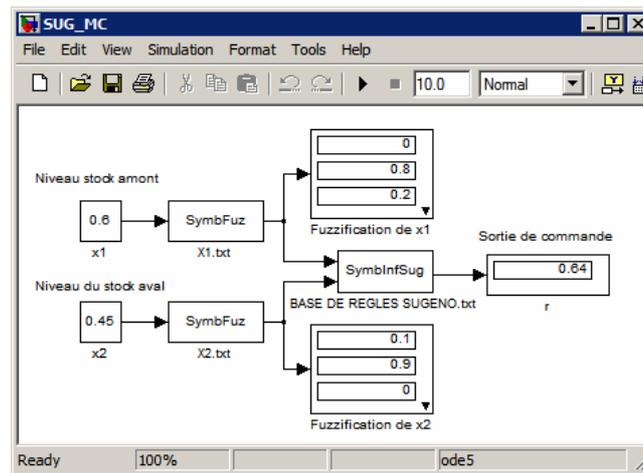


Figure 2.29 : Schéma d'implantation du contrôleur flou de Sugeno à deux entrées avec Floulib.

Contrairement à un contrôleur de Mamdani, la surface de commande associée au contrôleur flou de Sugeno est unique. Elle est illustrée sur la Figure 2.30.

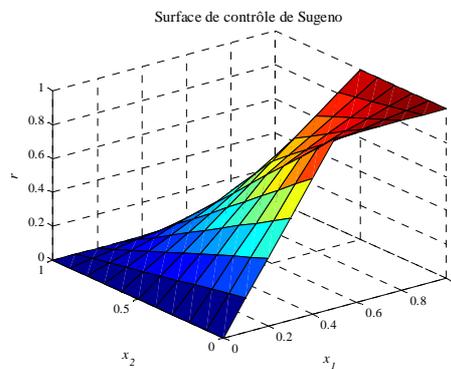


Figure 2.30 : Surface du contrôleur flou de Sugeno.

7.3. Discussion

D'une manière générale et quel que soit le type de contrôleur flou utilisé, l'intégration de la connaissance experte dans la conception du pilotage, notamment lorsque le nombre de paramètres à prendre en compte est grand, apporte une solution intuitive et simple. Toutefois, cette simplicité se paie par le fait qu'aucune méthodologie de synthèse ne soit réellement proposée. En effet, le relevé d'expertise est en fait traité cas par cas et reste difficilement généralisable à un système quelconque.

Cette carence méthodologique a conduit au développement de nombreux travaux visant à expliquer les performances attribuées aux contrôleurs flous et à établir un lien avec les contrôleurs conventionnels [Samanta and Al-Araimi, 2001 ; Suhail and Khan, 2005 ; Tamani et al., 2006a]. Dans le contexte du pilotage des flux de production, plusieurs études ont permis de justifier l'écriture de ces règles floues et leurs performances. En effet, à titre d'exemple, dans un problème de pilotage des encours sous une demande variable, Samanta et Al-Araimi [Samanta and Al-Araimi, 2001] comparent trois versions du contrôleur PID, à savoir : PID flou avec réinitialisation, PID flou sans réinitialisation et PID traditionnel où l'intérêt du flou est clairement mise en avance. Suhail et Khan [Suhail and Khan, 2005] comparent les performances d'un contrôleur flou avec un contrôleur « net » (crisp) dans le traitement du problème d'allocation de ressources dans un centre de charge. Dans l'article [Yuniarto and

Labib, 2005] cité précédemment, les auteurs illustrent l'amélioration des performances obtenues en termes d'encours global, de productivité et de coût total dans la version floue de la politique du point d'hésitation.

Les différentes études de simulation menées dans la littérature montrent que les approches floues apportent une amélioration des performances comparées aux techniques traditionnelles, particulièrement lorsque la charge du système est proche de la limite de faisabilité des demandes. Cet état de fait s'explique par la notion de raisonnement dont un contrôleur flou est doté qui lui permet d'intégrer des informations expertes difficilement exprimables à travers une expression purement analytique.

Il nous paraît utile de revenir sur quelques points importants concernant le choix du contrôleur flou. En effet, contrairement à la majorité des travaux existants, il est à nos yeux préférable d'utiliser un système de type Sugeno plutôt qu'un système de type Mamdani. Ce choix permet en effet d'éliminer les difficultés liées à la façon de considérer le système de Mamdani (forme conjonctive ou implicative) ainsi que la méthode de défuzzification qu'il faut utiliser. En effet, selon le choix des opérateurs d'inférence et de la méthode de défuzzification, différentes surfaces de contrôle sont obtenues (Cf. Figure 2.27 et Figure 2.31.a). Nous sommes d'ailleurs confortés dans cette opinion par le fait que nous n'avons trouvé aucun avantage à exploiter les opérateurs min/max préconisés par Mamdani, tout au moins dans un contexte de commande. Au contraire, l'usage de ces derniers entraîne l'apparition de non linéarités qui s'avèrent préjudiciables, non désirables et parfois incontrôlables. De plus, si les opérateurs de Mamdani sont remplacés par un produit et une somme bornée avec la méthode des hauteurs pour la défuzzification, le comportement des deux contrôleurs (Mamdani et Sugeno) est assez proche (Cf. Figure 2.31.b).

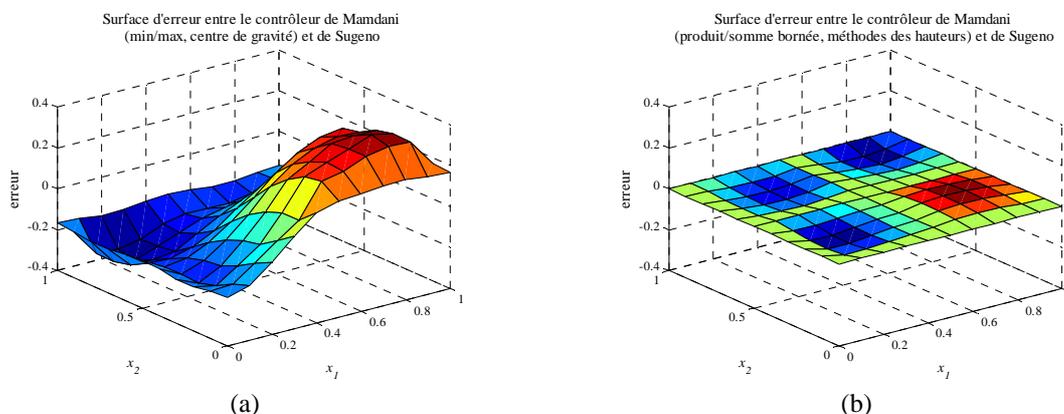


Figure 2.31 : Surfaces d'erreur entre les contrôleurs Mamdani et Sugeno.

Avant de terminer ce paragraphe, il est essentiel d'insister sur l'intérêt de nos travaux par rapport à l'existant. En effet, les avantages de notre méthode résident dans les points suivants :

- Contrairement aux méthodes existantes qui exploitent des systèmes flous symboliques (systèmes de Mamdani), nous proposons une synthèse de commande locale par un système flou numérique (système de Sugeno). En effet, de par ses caractéristiques telles que l'absence de la phase de défuzzification, un nombre de paramètres restreint et l'utilisation d'un mécanisme d'inférence unique évitant les opérateurs min/max sources de non linéarités indésirables et non contrôlables, ce type de système est mieux approprié dans le contexte de pilotage des systèmes de production.

- Une reformulation de la politique du point d'hésitation dans un cadre flou où toutes les informations locales qui interagissent entre les modules de production sont prises en compte explicitement dans la synthèse du contrôleur (le surplus et les niveaux des stocks intermédiaires).
- Une nouvelle méthodologie de conception du contrôleur (construction des univers de discours et les conclusions associées) est proposée. En effet, nous avons transposé la méthode d'optimisation initialement développée par Bai et Gershwin [Bai and Gershwin, 1994] pour fixer les univers de discours des entrées.
- La stratégie proposée exhibe clairement des propriétés telles que la contrôlabilité, faisabilité, ..., nécessaires à toutes techniques de commande robuste.

Il est important de rappeler que sous l'hypothèse d'un partitionnement strict des univers de discours des entrées, un système flou de Sugeno n'est autre qu'un système multi-linéaire par morceaux [Boukezzoula, 2000 ; Galichet et al., 2004]. Ce résultat, probablement connu par les spécialistes du domaine, n'est que très rarement énoncé de façon explicite. Cette caractéristique de multi-linéarité par morceaux permet d'intégrer ces contrôleurs dans bon nombre de structures de commande et d'aborder analytiquement l'évaluation des performances.

Avant de détailler la synthèse de la commande locale par un contrôleur flou de Sugeno, nous résumons sur la Figure 2.32 le cheminement suivi tout au long de cette partie.

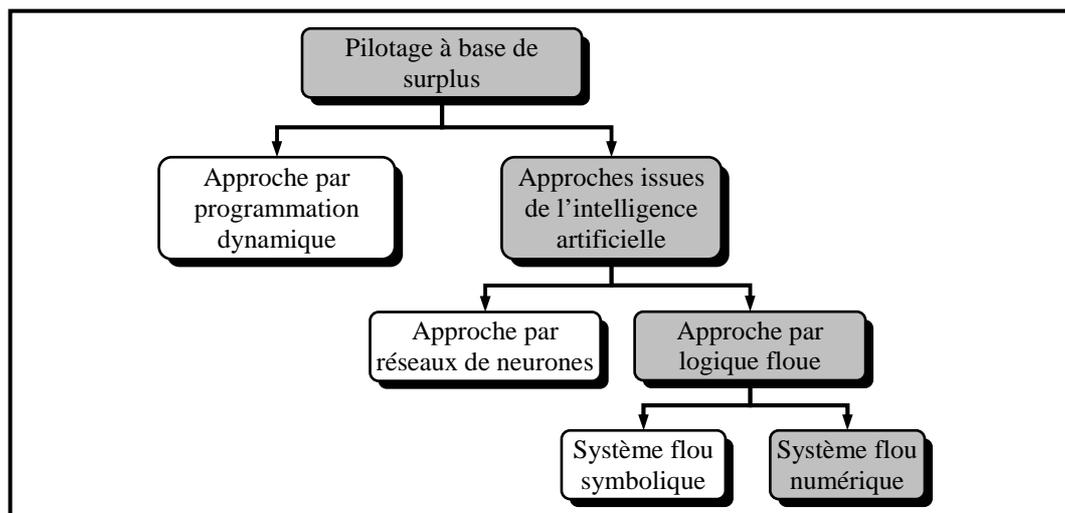


Figure 2.32 : Différentes approches de conception de la commande locale à base de surplus.

7.4. Analyse et synthèse d'un contrôleur de Sugeno

La synthèse d'un module de contrôle flou $MCF(i)$ est régie [Tamani et al., 2006b, 2008a] :

- d'une part par le besoin de maintenir les stocks d'entrée au-dessus du seuil de rupture et les stocks de sortie au-dessous du seuil de blocage, et
- d'autre part assurer un surplus de production qui permettra de compenser les pertes occasionnées par les aléas de fonctionnement.

Dans ce contexte, l'appréciation de l'état de rupture ou de blocage est relative aux capacités maximales des stocks intermédiaires, alors que l'état du surplus est jugé en référence à son seuil critique (point d'hésitation).

Ainsi, la loi de commande générée par le module de contrôle $MCF(i)$ capable de réguler le taux de production du module $MP(i)$ est guidée par les observations suivantes :

- Si le niveau du surplus est satisfaisant, alors allouer la capacité de production appropriée pour éliminer ou anticiper les phénomènes de rupture (ou famine) et de blocage.
- Si le niveau du surplus n'est pas satisfaisant, *i.e.* la production est soit en retard, soit en excès par rapport à la demande, alors produire respectivement au taux maximum ou arrêter la production.

Intuitivement, un stock tend à se vider lorsque la machine en amont est en panne ou bien qu'elle produit à une cadence inférieure à celle de la machine en aval. Réciproquement, un stock tend à se saturer si la machine en aval est en réparation ou bien qu'elle travaille à un taux inférieur à celui de la machine en amont. Le contrôleur a pour objectif de maintenir les stocks à un niveau de sécurité permettant de compenser d'éventuelles pertes dues aux pannes, rupture et blocage. Dans la conception du module de contrôle flou $MCF(i)$, une étape importante réside dans le partitionnement des univers de discours des entrées utilisées (domaine de définition de $x_i(t)$, $x_l(t)$ et $s_i(t)$).

7.4.1. Définition des univers de discours

Les capacités maximales des stocks intermédiaires x_l^{\max} et x_i^{\max} représentent les univers de discours des variables $x_l(t)$ et $x_i(t)$ données par les intervalles $[0, x_l^{\max}]$ et $[0, x_i^{\max}]$. L'univers de discours de la variable de surplus $s_i(t)$ est défini en fonction du seuil z_i donné par l'intervalle $[s_i^{\min}, s_i^{\max}]$. Dans ce cas, sous l'hypothèse d'un partitionnement symétrique, on peut prendre comme univers de discours l'intervalle $[0, 2z_i]$ où z_i représente la valeur modale (la valeur pour laquelle la fonction d'appartenance vaut 1) du sous-ensemble flou des valeurs désirées.

Dans ce paragraphe, pour pouvoir estimer les paramètres définissant les univers de discours, nous exploitons la méthodologie proposée par [Bai and Gershwin, 1994] dans le cas des lignes de transformation. Cette approche permet, à partir de la relation entre les objectifs (demandes) et les perturbations (pannes, rupture et blocage), de donner une estimation des capacités des stocks et des seuils de sécurité du surplus.

Pour des raisons de simplicité, la technique proposée est détaillée pour un seul module de production $MP(i)$, inséré entre le module amont $MP(l)$ et le module aval $MP(j)$ (Cf. Figure 2.16). Le même principe peut être déployé pour les autres modules élémentaires.

Dans la suite, les notations suivantes sont utilisées.

Pour $\nu \in \{i, j, l\}$:

- x_ν^{\max} : est la capacité maximale du stock B_ν .
- z_ν^r : est le niveau de maintien moyen du stock de sortie B_ν à l'instant où $MP(\nu)$ subit une panne. Autrement dit, c'est le niveau du stock lorsque le surplus de $MP(\nu)$ atteint son seuil critique z_ν (point d'hésitation).
- z_ν^b : est la capacité libre restante du stock B_ν à l'instant où le module en aval tombe en panne. Autrement dit, c'est l'espace libre de B_ν lorsque le surplus de $MP(\nu)$ atteint son seuil critique z_ν .
- F_ν^r : est le taux de rupture de $MP(\nu)$.
- F_ν^b : est le taux de blocage de $MP(\nu)$.

A. Estimation de la capacité maximale des stocks

Les capacités maximales des stocks intermédiaires amont x_l^{\max} et aval x_i^{\max} du module $MP(i)$ sont données par (Cf. Figure 2.33) :

$$x_l^{\max} = z_l^r + z_l^b ; x_i^{\max} = z_i^r + z_i^b \quad (2.20)$$

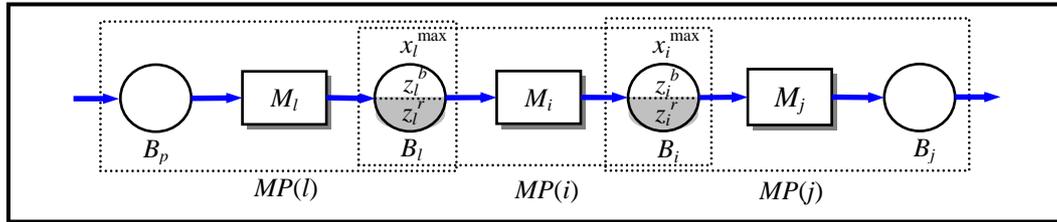


Figure 2.33 : Représentation de paramètres des stocks intermédiaires.

A partir de (2.20), l'estimation des capacités maximales des stocks du module $MP(i)$ consiste alors à fixer :

- Pour le stock d'entrée B_l de M_i , le seuil minimum z_l^r nécessaire afin d'éviter une rupture durant le temps de réparation du module en amont $MP(l)$.
- Pour le stock de sortie B_i de M_i , la capacité libre restante minimale z_i^b permettant d'éviter un blocage durant le temps de réparation du module en aval $MP(j)$.

Sachant que le stock d'entrée B_l représente le stock de sortie du module $MP(l)$, la marge z_l^b définit alors l'espace libre pour le maintien en production sans blocage du module $MP(l)$ durant le temps de réparation du module $MP(i)$. De façon similaire, la marge z_i^r représente le stock de maintien en production sans rupture du module en aval $MP(j)$ pendant le temps de réparation du module $MP(i)$ (Cf. Figure 2.33).

En supposant que le module $MP(l)$ n'est jamais en rupture ($F_l^r = 0$) et que le module $MP(j)$ n'est jamais en blocage ($F_j^b = 0$), les différents paramètres z_l^r , z_l^b , z_i^r et z_i^b , sont déterminés par résolution du problème de programmation non-linéaire suivant [Bai and Gershwin, 1995] :

$$\min \{z_l^r + z_l^b + z_i^r + z_i^b\} \quad (2.21)$$

Sous les contraintes :

$$\begin{cases} F_l^b \leq 1 - d/d_i^{\max} \\ F_i^r + F_i^b \leq 1 - d/d_i^{\max} \\ F_j^r \leq 1 - d/d_j^{\max} \end{cases} \quad (2.22)$$

où d_i^{\max} est la demande maximale que le module $MP(i)$, pris en isolation, peut satisfaire. Elle est donnée par :

$$d_i^{\max} = (\mu_i / (\mu_i + \lambda_i)) u_i^{\max} \quad (2.23)$$

Les détails des calculs des paramètres : taux de rupture F_{σ}^r et taux de blocage F_{σ}^b , pour $\sigma \in \{l, i, j\}$ dans l'équation (2.22) sont donnés en Annexe A.

B. Estimation du niveau du surplus de sécurité (seuil critique)

L'estimation de la marge de sécurité sur le surplus est déterminée à partir des pertes dues aux perturbations qui peuvent altérer le bon fonctionnement du module $MP(i)$. En effet, les pannes ainsi que les situations de rupture et de blocage induisent une évolution de la tendance moyenne du surplus au dessous de son seuil critique. Cette différence est estimée par la valeur Δ_i donnée par l'expression suivante [Bai and Gershwin, 1995] :

$$\Delta_i = \frac{\lambda_i \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{d}{2} \left(\frac{u_i^{\max}}{u_i^{\max} - d} \right) \left[\left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2 + \left(\frac{F_i^r}{\lambda_i} \right)^2 + \left(\frac{F_i^b}{\lambda_i} \right)^2 \right] \quad (2.24)$$

Le détail de l'obtention de la relation (2.24) est donné en Annexe B.

A partir de l'équation (2.1), le niveau du stock $x_i(t) = y_i(t) - y_j(t)$ peut s'exprimer en fonction du surplus comme suit :

$$x_i(t) = s_i(t) - s_j(t) \quad (2.25)$$

Dans ce cas, lorsque le stock B_i atteint son seuil minimal z_i^r les surplus des modules amont et aval de B_i sont à leur niveau de sécurité. En fonction de ces derniers, la relation (2.25) s'écrit comme suit :

$$z_i^r = z_i - z_j \quad (2.26)$$

Les niveaux de sécurité du surplus sont à choisir de telle sorte que le surplus final moyen tend vers zéro (objectif du contrôle). Pour la ligne de transformation considérée (Cf. Figure 2.33), les seuils z_l, z_i, z_j sont choisis en supposant que $\bar{s}_j = 0$ (surplus moyen du dernier module). Dans ce cas, à partir des équations (2.24) et (2.26), nous obtenons la valeur des seuils de sécurité du surplus en remontant du dernier module vers le premier. Soit :

$$\begin{cases} z_j = \bar{s}_j + \Delta_j = \Delta_j \\ z_i = z_j + z_i^r = \Delta_j + z_i^r \\ z_l = z_i + z_l^r = \Delta_j + z_i^r + z_l^r \end{cases} \quad (2.27)$$

7.4.2. Partitionnement des univers de discours

Après avoir déterminé les univers de discours associés aux variables d'entrée, le partitionnement de ces derniers est laissé à l'appréciation de l'expert concepteur de la stratégie de pilotage. Pour des raisons de simplicité, nous supposons un partitionnement strict des univers de discours avec des fonctions d'appartenance triangulaires régulièrement réparties. Par exemple, l'expert peut décider d'utiliser cinq mots (symboles) pour décrire les attributs du niveau du stock $x_i(t)$: « Vide », « Partiellement Vide », « Normal »,

« Partiellement Saturé » et « Saturé ». Ces états se traduisent par cinq sous-ensembles flous (symboles flous) $X_i = \{X_i^l\}_{l=1,\dots,5}$ (Cf. Figure 2.34.a). Le même raisonnement peut être utilisé pour la variable $x_i(t)$.

Le partitionnement de l'univers de discours de la variable du surplus $s_i(t)$ doit être effectué selon la valeur du seuil z_i . Ce partitionnement a pour objectif de faire tendre le surplus autour de z_i . Dans ce cas, nous considérons trois mots pour interpréter l'état de la variable du surplus : « Retard », « Normal » et « Excès ». Soit alors, un partitionnement en trois sous-ensembles flous $S_i = \{S_i^l\}_{l=1,\dots,3}$ (Cf. Figure 2.34.b). La valeur modale s_i^{mod} du sous-ensemble flu correspondant au mot « Normal » représente le seuil critique du surplus z_i . Comme cette valeur est supposée positive, et sous l'hypothèse d'un partitionnement symétrique et strict de l'univers de discours, les bornes de l'intervalle $[s_i^{\text{min}}(z_i), s_i^{\text{max}}(z_i)]$ sont choisies respectivement égales à 0 et $2z_i$.

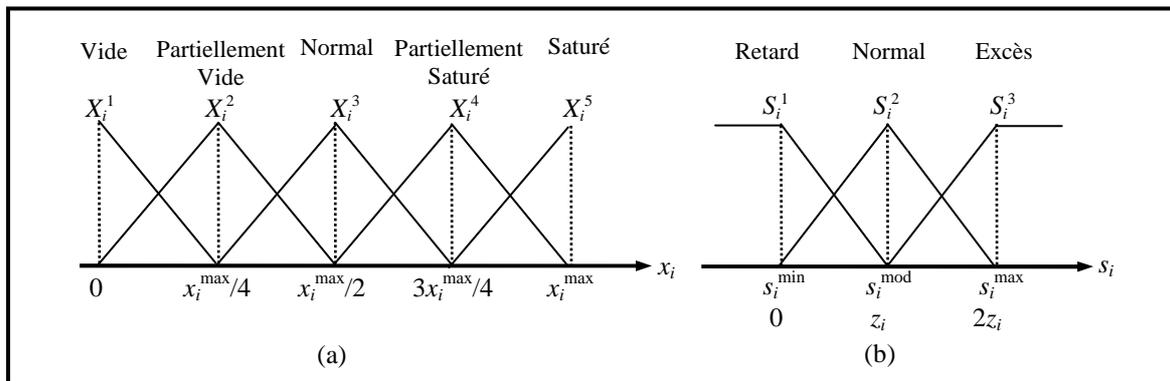


Figure 2.34 : Description floue des variables entrées du contrôleur : (a) niveau du stock, (b) surplus.

La sortie du contrôleur flu $r_i(t)$ représente le facteur de pondération du taux de production maximal du module $MP(i)$. Ce dernier détermine son taux de production instantané (la capacité allouée au traitement), conformément à l'équation (2.3). En effet, suivant l'état des variables $x_i(t)$ (niveau du stock d'entrée) et $x_i(t)$ (niveau du stock de sortie) et $s_i(t)$ (surplus), l'expert peut décider de fixer le taux de production au : « Maximum », « Proche du maximum », « Moyen », « Proche de zéro » ou « Zéro ». Dans le contexte d'un contrôleur flu de Sugeno, ces descriptions peuvent être interprétées par des valeurs constantes exprimant le pourcentage de capacité alloué à chaque instant. Soit, par exemple, les valeurs possibles suivantes de $r_i(t)$: 1 (production à 100% de capacité), 0.75 (75% : proche du maximum), 0.5 (50% : moyen), 0.25 (25% : proche de zéro) et zéro (arrêt de production).

7.4.3. Base de règles et représentation entrée-sortie floue

La représentation entrée-sortie du module de contrôle flu $MCF(i)$ associé à $MP(i)$ est donnée par un système flu de Takagi-Sugeno à conclusion constante de la forme (2.17) [Takagi and Sugeno, 1985 ; Sugeno, 1999]. Ce dernier est représenté par la collection de règles de la forme suivante [Tamani et al., 2006b, 2008a] :

$$R_i^{(i_1, i_2, i_3)} : \text{Si } x_l \text{ est } X_l^{i_1} \text{ et } x_i \text{ est } X_i^{i_2} \text{ et } s_i \text{ est } S_i^{i_3} \text{ alors } r_i = \varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)} \quad (2.28)$$

avec :

- $X_l^{i_1}, X_i^{i_2}$ et $S_i^{i_3}$ représentent respectivement le $i_m^{\text{ième}}$ ($m = 1, 2, 3$) terme linguistique (symbole flu) associé aux variables d'entrées $x_l(t)$, $x_i(t)$ et $s_i(t)$ (Cf. Figure 2.34).

- $\varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)}$ représente la conclusion de la règle indexée (i_1, i_2, i_3) .

Pour le partitionnement illustré sur la Figure 2.34, $i_m \in I_m = \{1, \dots, 5\}$ pour $m = 1, 2$; et $i_3 \in I_3 = \{1, 2, 3\}$, la base de règles complète $I = I_1 \times I_2 \times I_3$ est alors composée de : $5 \cdot 5 \cdot 3 = 75$ règles. La sortie générée par le contrôleur flou $r_i(t) \in [0, 1]$ est donnée par :

$$r_i(t) = \begin{cases} 0 & , \text{si } \alpha_i(t) = 0 \\ \psi_i(x_l(t), x_i(t), s_i(t)) & , \text{si } \alpha_i(t) = 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

où ψ_i est la relation entrée-sortie du contrôleur donnée selon (2.18) par l'expression suivante :

$$\psi_i(x_l(t), x_i(t), s_i(t)) = \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in I} \xi_i^{(i_1, i_2, i_3)}(x_l, x_i, s_i) \cdot \varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)} \quad (2.30)$$

avec $\xi_i^{(i_1, i_2, i_3)}(x_l, x_i, s_i) = \mu_{x_l^{i_1}}(x_l) \cdot \mu_{x_i^{i_2}}(x_i) \cdot \mu_{s_i^{i_3}}(s_i)$ représente le degré de vérité de la prémisse de la règle (2.28). La base de règles complète dans le cas d'un module de transformation est donnée dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Base de règles du module de contrôle flou $MCF(i)$.

Règles	Entrées du contrôleur			Sortie du contrôleur
	Stock en amont x_l	Stock en aval x_i	Surplus s_i	$\varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)}$
1	Vide	ANY	ANY	0
2	ANY	Saturé	ANY	0
3	Non Vide	Non Saturé	Retard	1
4	Partiellement Vide	Non Saturé	Excès	0
5	Normal	Non Saturé	Excès	0
6	Partiellement Saturé	Vide	Excès	0.75
7	Partiellement Saturé	Partiellement Vide	Excès	0.5
8	Partiellement Saturé	Normal	Excès	0.25
9	Partiellement Saturé	Partiellement Saturé	Excès	0.25
10	Saturé	Vide	Excès	1
11	Saturé	Partiellement Vide	Excès	0.75
12	Saturé	Normal	Excès	0.5
13	Saturé	Partiellement Saturé	Excès	0.25
14	Partiellement Vide	Vide	Normal	0.5
15	Partiellement Vide	Partiellement Vide	Normal	0.25
16	Partiellement Vide	Normal	Normal	0.25
17	Partiellement Vide	Partiellement Saturé	Normal	0.25
18	Normal	Vide	Normal	1
19	Normal	Partiellement Vide	Normal	0.75
20	Normal	Normal	Normal	0.5
21	Normal	Partiellement Saturé	Normal	0.25
22	Partiellement Saturé	Vide	Normal	1
23	Partiellement Saturé	Partiellement Vide	Normal	0.75
24	Partiellement Saturé	Normal	Normal	0.5
25	Partiellement Saturé	Partiellement Saturé	Normal	0.25
26	Saturé	Vide	Normal	1
27	Saturé	Partiellement Vide	Normal	1
28	Saturé	Normal	Normal	1
29	Saturé	Partiellement Saturé	Normal	0.5

Dans le Tableau 2.3, la variable « ANY » peut être remplacée par n'importe quel terme linguistique de l'ensemble des symboles flous de la variable d'entrée correspondante, tandis que la variable « $Non X^{i_m}$ » peut être substituée par un symbole flou de l'ensemble $X \setminus X^{i_m}$, *i.e.*, n'importe quel élément de X à l'exception du terme X^{i_m} , $\forall i_m \in I_m$ pour $m = 1, 2$ avec $X \in \{X_l, X_i\}$. Ceci est une façon de simplifier la représentation du nombre de règles floues utilisées.

Par exemple, la règle suivante :

$$\text{Si } x_l \text{ est ANY et } x_i \text{ est Saturé et } s_i \text{ est ANY alors } r_i = 0$$

signifie que, quel que soit l'état du stock d'entrée $x_l(t)$ et du surplus $s_i(t)$ du module $MP(i)$, si le stock de sortie est saturé, *i.e.*, $x_i(t) = x_i^{\max}$ alors la sortie du contrôleur $MCF(i)$ stoppe la production de $MP(i)$.

A titre d'illustration, la Figure 2.35 donne les surfaces de la réponse du $MCF(i)$ en fonction des niveaux de ses stock amont et aval pour différentes valeurs du surplus. Toutes les entrées sont normalisées entre 0 et 1.

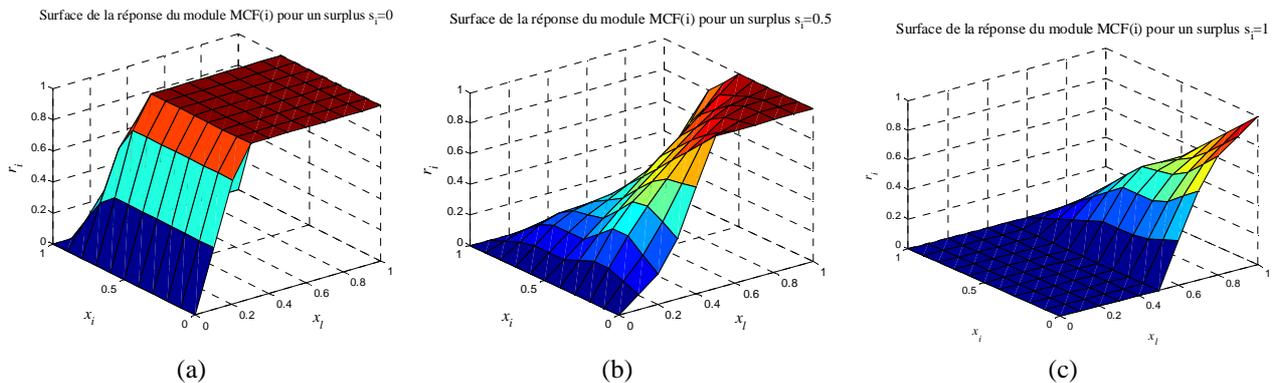


Figure 2.35 : Surface de la réponse du module de contrôle flou $MCF(i)$.

Ces différentes surfaces montrent le comportement non linéaire du contrôleur flou ainsi que le phénomène d'interpolation implanté par ce dernier en fonction du surplus et des stocks intermédiaires.

7.5. Propriétés du système de pilotage

Les techniques de pilotage développées doivent non seulement assurer les performances recherchées du système réel, mais aussi garantir a priori le bon fonctionnement avant même leur mise en oeuvre sur le système (problème d'analyse). Dans ce cas, les problèmes de contrôlabilité, faisabilité et stabilité sont à prendre en considération.

7.5.1. Contrôlabilité

La première propriété à valider sur le système de production avant même la conception de la stratégie de pilotage est sa contrôlabilité. Autrement dit, dans le cas où le système n'est pas contrôlable, il est illusoire d'essayer de trouver une séquence de commande pour l'amener à suivre l'objectif désiré. A partir du modèle fluide décrit dans le Chapitre 1, il est possible de vérifier la contrôlabilité du système à travers le critère de Kalman [Larminat, 1993]. En effet, partant de la représentation d'état utilisée (Cf. équation (1.4)), il est possible d'appliquer le critère de Kalman donné par :

$$\text{Rang}[B|A \cdot B| \dots |A^{n-1} \cdot B] = n \quad (2.31)$$

Pour une équation d'état sous la forme :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

Autrement dit, si le rang de la matrice $[B|A \cdot B| \dots |A^{n-1} \cdot B]$ est plein alors le système est toujours contrôlable. Dans notre formulation, sachant que $A = 0$ alors le critère de Kalman se limite au rang de la matrice B . Par la structure de notre système de production, il est impossible de trouver dans la matrice B des vecteurs linéairement dépendants, ce qui prouve que notre système est toujours contrôlable (le rang de la matrice B est toujours plein).

7.5.2. Faisabilité

Le concept de faisabilité vise à s'assurer que l'objectif demandé ou spécifié est accessible et admissible par le système. Autrement dit, il est nécessaire de vérifier que le système à piloter dispose de suffisamment de capacité pour que toutes les demandes soient satisfaites.

Dans le cas d'un module de production élémentaire $MP(i)$, la condition de faisabilité est donnée par l'expression suivante :

$$d\tau_i \leq e_i \leq 1 \quad (2.32)$$

où e_i représente la disponibilité intrinsèque de la machine M_i du module $MP(i)$ prise en isolation. Cette disponibilité est généralement estimée à partir de ses taux de panne λ_i et de réparation μ_i . Dans le cas où ces derniers suivent des distributions exponentielles de moyennes respectivement $1/\lambda_i$ et $1/\mu_i$, cette disponibilité s'exprime comme suit :

$$e_i = \left(\frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \right) \quad (2.33)$$

Ainsi, l'expression (2.23) de la demande maximale d_i^{\max} que le module $MP(i)$, pris en isolation peut satisfaire, se reformule comme suit :

$$d_i^{\max} = e_i \cdot u_i^{\max} \quad (2.34)$$

Pour un système de production composé de N modules élémentaires, la condition de faisabilité doit être vérifiée sur tous les modules élémentaires, c'est-à-dire :

$$0 < d \leq \min_{i=1, \dots, N} \{ d_i^{\max} \} \quad (2.35)$$

L'équation (2.35) est une condition nécessaire pour la stabilité de la politique de pilotage des flux [Perkins and Kumar, 1989].

7.5.3. Stabilité

La stabilité des boucles de commande est généralement assurée dans la mesure où tous les signaux d'entrée et de sortie restent bornés. Intuitivement, l'étude de la stabilité d'un système de production est basée sur l'équilibre des flux entrant et sortant. La différence entre les deux

flux représente le nombre de pièces dans les stocks intermédiaires (variables d'état x_i) ainsi que celles en cours de transformation sur les machines.

Une accumulation non bornée des flux peut être considérée comme une instabilité du système. D'autre part, une rupture prolongée du stock induit d'importants retards sur la production, qui peut être vue aussi comme une instabilité des flux. Cette différence s'interprète dans le pilotage des flux par la notion du surplus. Si le surplus à chaque module de production $MP(i)$ est borné, alors le système est dit stable. Dans ce cas, il existe une constante finie ω_i telle que :

$$\sup_t |s_i(t)| \leq \omega_i < +\infty, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.36)$$

Dans la littérature, plusieurs études ont été menées sur la stabilité du pilotage à base de modèle fluide des flux. Citons à titre indicatif les travaux de Perkins et al. [Perkins et al., 1994] qui traitent de la stabilité sous l'effet de phénomènes dus à la sporadicité des flux (burstiness) dans le cas d'un pilotage distribué pour un système multi-machines/multi-produits déterministe. Dans ce cadre, une forme de régulateur pour stabiliser le système est proposée. De son côté, Dai [Dai, 1996] établit la relation entre le transitoire du modèle discret et son approximation fluide, plus particulièrement, il montre les limites de validité de la condition de faisabilité (2.35) pour la stabilité. D'autre part, la synthèse par la théorie de Lyapunov a fait l'objet de plusieurs travaux sur l'étude de la stabilité du pilotage des flux de production. Dans ce contexte, Ye et Chen [Ye and Chen, 2001] donnent une condition nécessaire et suffisante de stabilité du modèle fluide d'un réseau files d'attente. Dai et Weiss [Dai and Weiss, 1996] définissent des résultats sur la stabilité des systèmes cycliques. Rovithakis et al. [Rovithakis et al., 1999] à travers la loi de commande développée via la synthèse de Lyapunov, prouvent la stabilité par la bornitude des différents signaux entrées-sorties du contrôleur synthétisé. Pour plus de détails sur les résultats énoncés, le lecteur est invité à consulter les références citées. Il est important de noter ici que ces résultats concernent essentiellement le cas déterministe. Les aléas tels que les pannes et les changements de demande ne sont pas pris en compte.

Dans notre cas, pour la synthèse du pilotage des flux, nous considérons la condition nécessaire de stabilité des flux (2.35) en supposant que le système dispose de suffisamment de capacité pour satisfaire toutes les demandes.

8. Exemple illustratif

Pour illustrer la méthodologie et les performances de la commande floue locale, nous reprenons l'exemple de la ligne de production à 4 modules de transformation $MP(i)$ traité au premier chapitre en gardant la même configuration (taux de pannes et de réparations, temps opératoires). Un module de contrôle flou $MCF(i)$ est synthétisé pour chaque $MP(i)$. Soit alors une ligne à 4 modules de transformation contrôlés $MPC(i)$ (Cf. Figure 2.36).

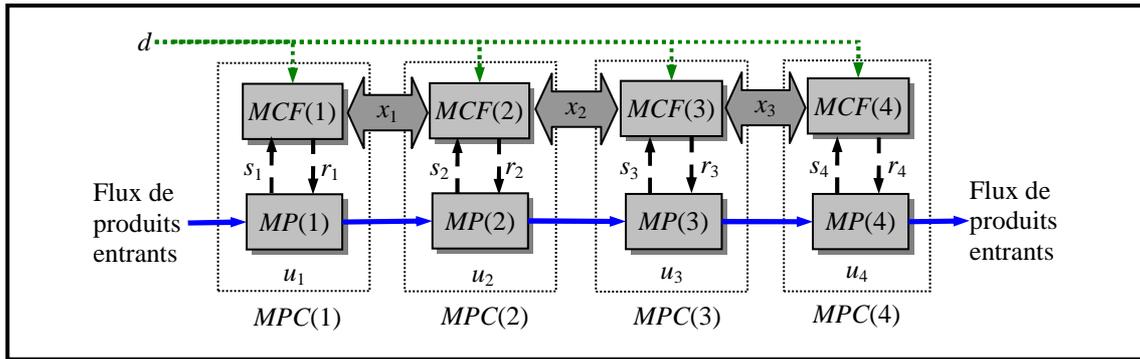


Figure 2.36 : Ligne de transformation contrôlée.

Dans ce cas, à partir du modèle fluide du système, le critère de contrôlabilité donné par l'équation (2.31) est vérifié. En effet :

$$\text{Rang}(B) = \text{Rang} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = 4$$

Pour une demande de taux constant $d = 0.7$ produits par unité de temps, la condition de faisabilité (2.35) est satisfaite. En effet, pour la configuration du système considérée, cette condition donne :

$$0 < d \leq \min_{i=1,\dots,4} \{d_i^{\max}\} = \min\{1.25, 2.667, 1, 1.38\}$$

Soit :

$$0 < d \leq 1$$

L'objectif du pilotage est de suivre de plus près la trajectoire de la demande au cours du temps tout en maintenant un surplus final moyen borné autour de son seuil critique et de maintenir un niveau d'encours minimal.

A partir de la relation (2.24), les pertes en surplus estimées au niveau du dernier module de la ligne de transformation donne $\Delta_4 = 1.20$. Le Tableau 2.4 résume les paramètres obtenus pour chaque module de contrôle flou en résolvant respectivement (2.21) et (2.27).

Tableau 2.4 : Paramètres des modules de contrôle flou pour $d = 0.7$.

i	F_i^r	F_i^b	z_i^r	z_i^b	x_i^{\max}	z_i
1	0.00	0.44	1.40	0.00	2	3.96
2	0.00	0.30	0.00	2.34	3	2.56
3	0.65	0.00	1.36	2.34	5	2.56
4	0.34	0.00	-	-	-	1.20

Les paramètres z_i^r et z_i^b sont arrondis à la valeur entière supérieure pour obtenir la capacité maximale des stocks intermédiaires selon (2.20).

Les univers de discours des entrées de chaque module de contrôle flou sont fixés à $[0, x_i^{\max}]$ pour le niveau des stocks et $[0, 2z_i]$ pour le surplus. Les stocks d'entrée et de sortie sont supposés de capacité infinie.

L'approche de commande locale floue est évaluée par simulation continue sous l'outil MATLAB/Simulink et la librairie Floulib (Cf. Figure 2.37). Dans les simulations, un pas de discrétisation de $\delta t_n = 0.1$ unités de temps est considéré. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures ci-après.

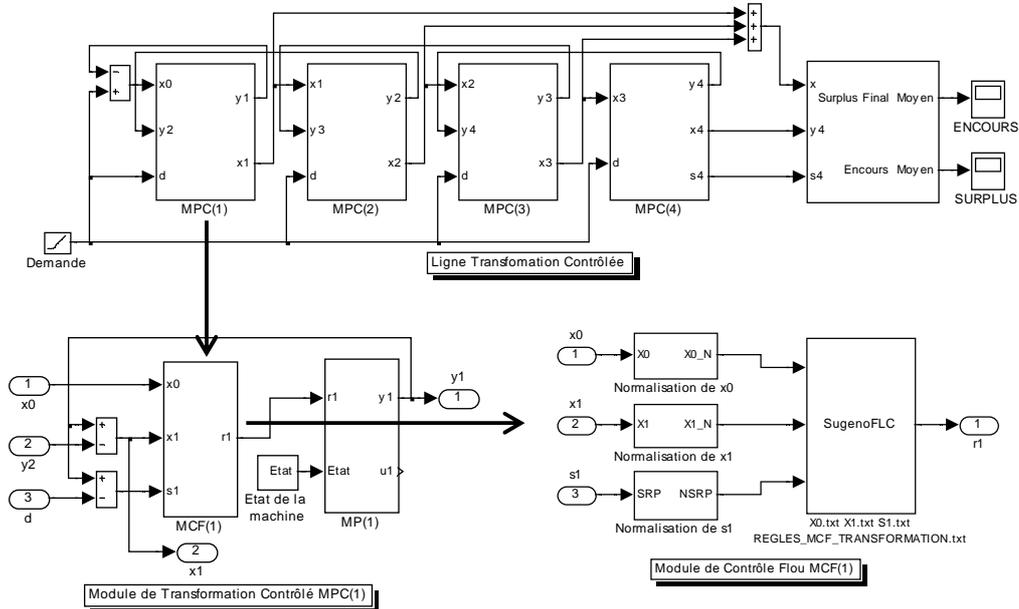


Figure 2.37 : Schéma de simulation de la ligne de transformation contrôlée sous MATLAB/Simulink et Floulib.

La Figure 2.38 donne une illustration de l'évolution de la production du système piloté et non piloté. Dans le cas non piloté, le système produit à capacité maximale en supposant qu'il y a toujours des produits disponibles en entrée et que le stock de sortie est à capacité infinie. Dans le cas piloté, on constate un bon suivi de la demande.

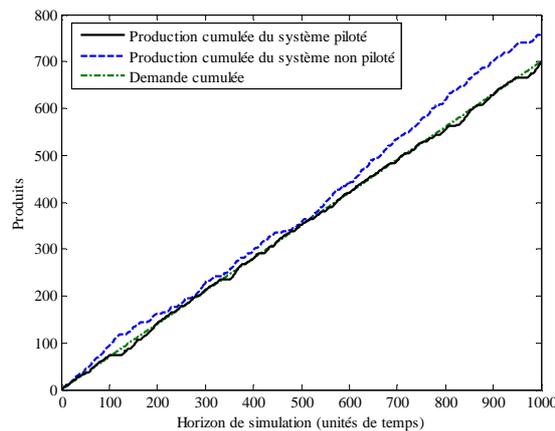


Figure 2.38 : Evolution de la production cumulée par rapport à la demande.

La Figure 2.39.a et la Figure 2.39.b montrent respectivement l'évolution au cours du temps des performances de l'encours moyen et du surplus final, dans les deux cas du système piloté et non piloté.

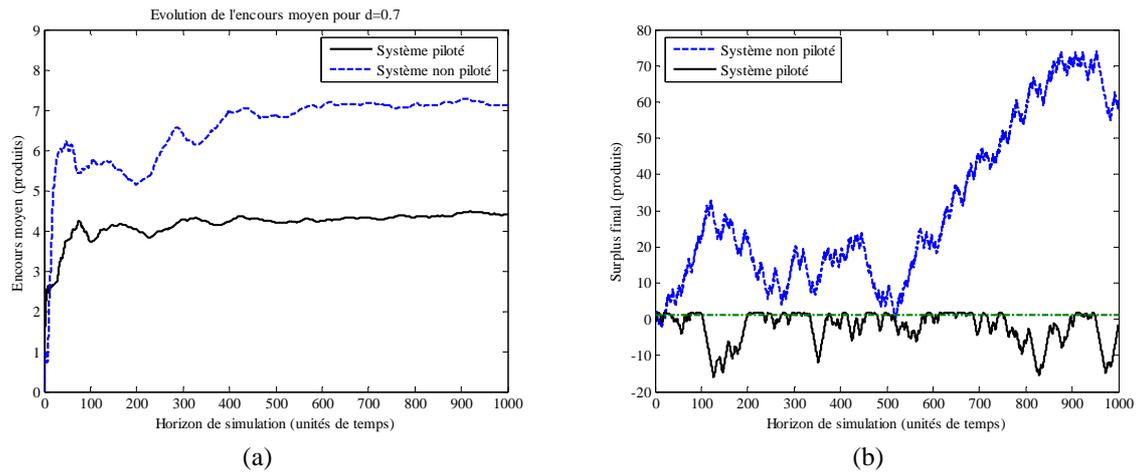


Figure 2.39 : Evolution des Performances du système : (a) encours moyen, (b) surplus final.

La Figure 2.40 illustre l'évolution du taux de production instantané du module de sortie de la ligne de transformation.

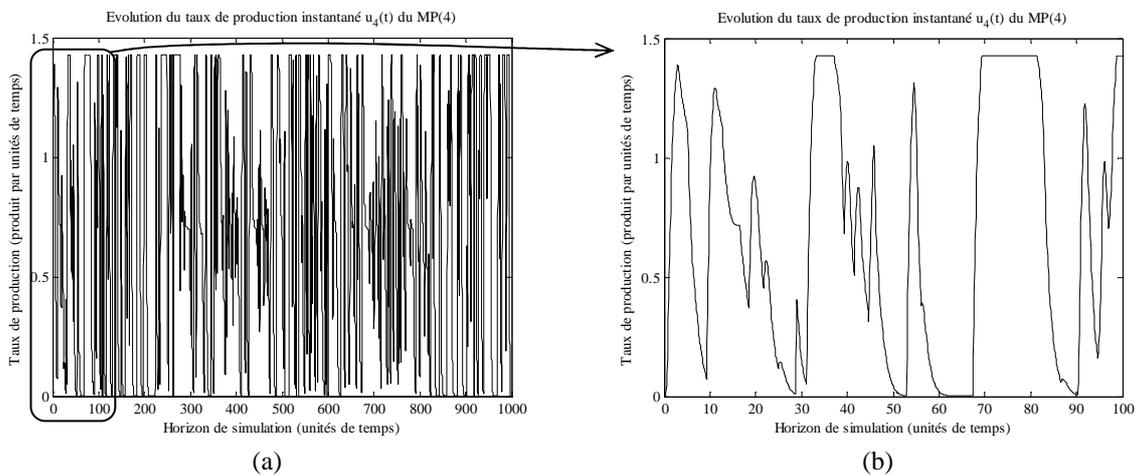
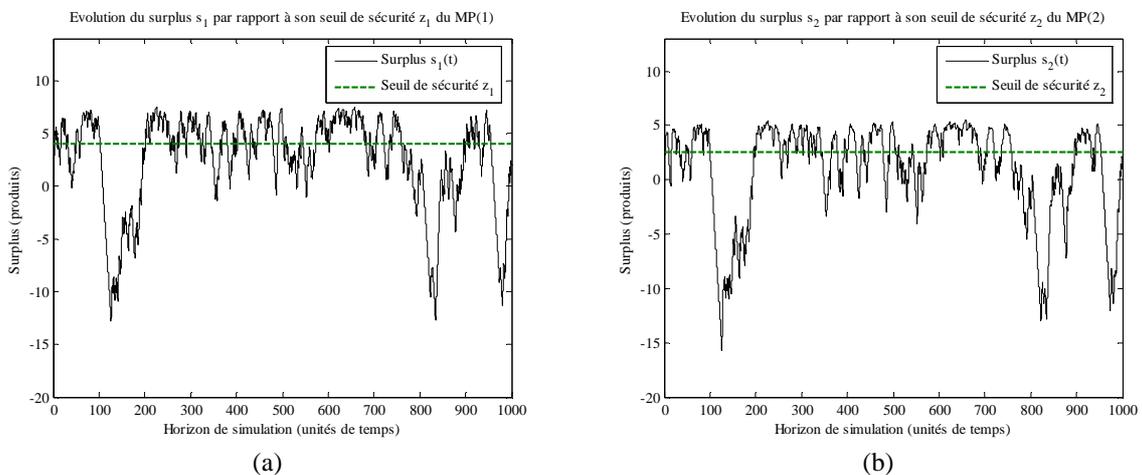


Figure 2.40 : Evolution du taux de production instantané du dernier module de la ligne de transformation.

La Figure 2.41 montre le surplus local à chaque module de transformation par rapport à son seuil de sécurité.



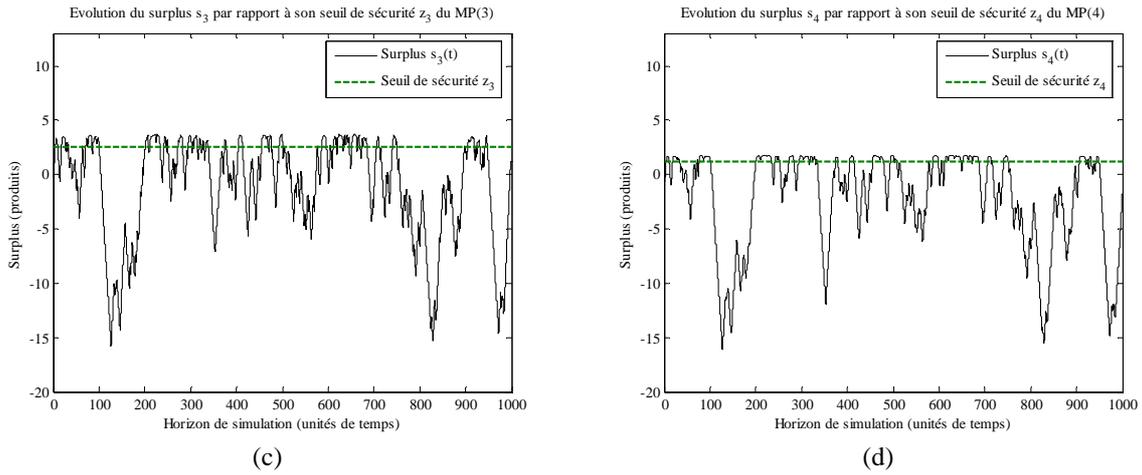


Figure 2.41 : Evolution du surplus local de chaque module contrôlé.

La Figure 2.42 donne la tendance moyenne du taux de production de chaque module de transformation sous l'action de la commande floue.

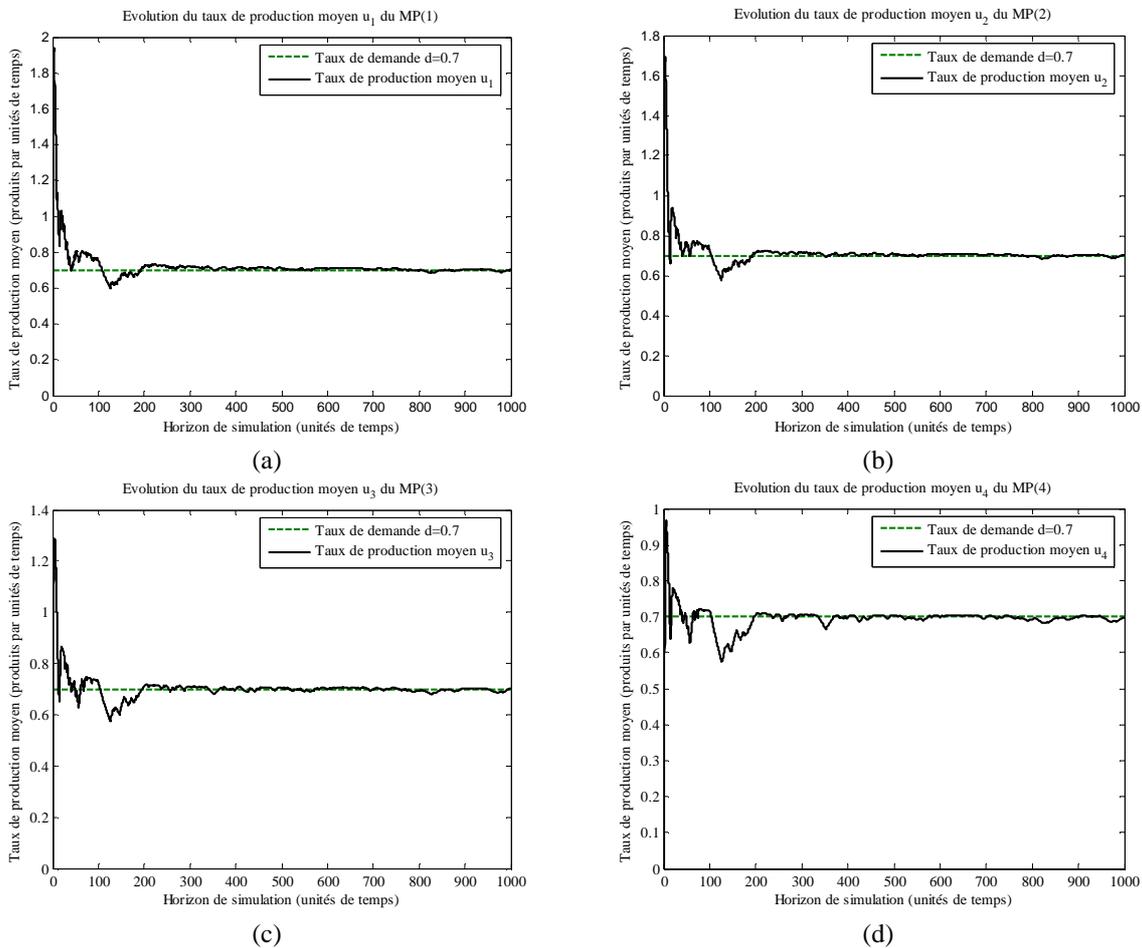


Figure 2.42 : Tendance moyenne des taux de production de chaque module de production.

La Figure 2.43 illustre l'influence des pannes (pannes du module $MP(4)$) et des ruptures (charge du stock x_3) sur l'évolution du surplus final.

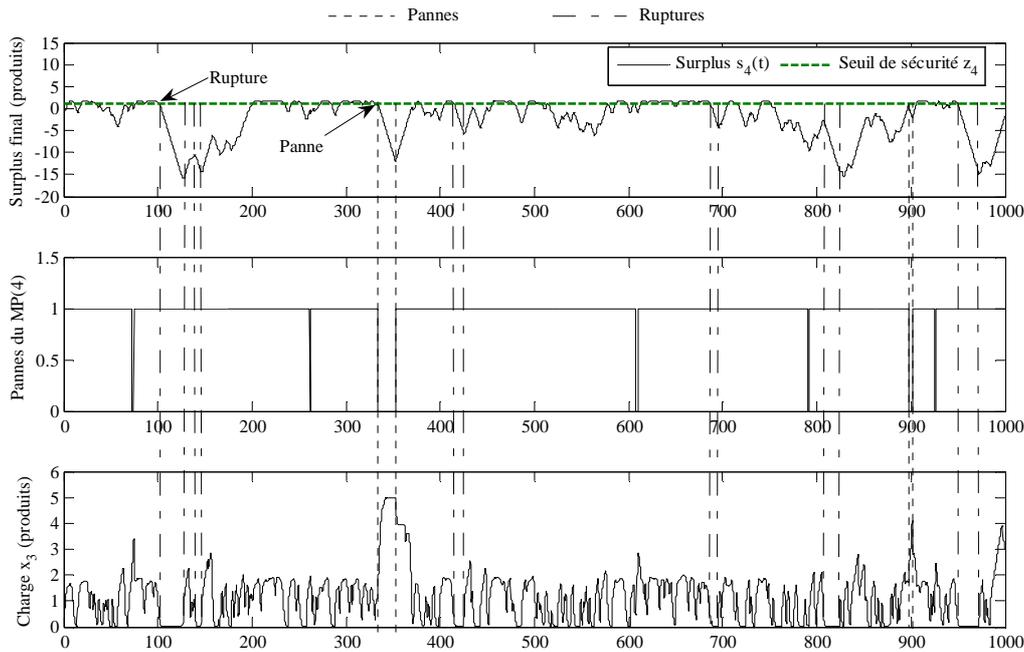


Figure 2.43 : Influence des pannes et ruptures sur le surplus final.

A partir des résultats de simulation obtenus, on peut déduire que les performances de suivi de trajectoire sont satisfaisantes (Cf. Figure 2.38) dans la mesure où la performance du surplus final reste bornée et proche de son seuil critique (Cf. Figure 2.39.b). La commande locale contribue aussi au maintien d'un encours moyen minimal et stable (Cf. Figure 2.39.a).

Les performances du surplus local au niveau de chaque module de production montrent l'efficacité de la commande locale. Cependant, les pannes aléatoires et leur propagation sous forme de rupture et de blocage induisent des fluctuations du surplus autour de son seuil de sécurité (Cf. Figure 2.43). À ce niveau, il est important d'insister sur le fait que les paramètres des contrôleurs sont calculés sur la base des durées moyennes des pannes et que les valeurs obtenues donnent une tendance moyenne. Ainsi, un ajustement de ces valeurs autour de leurs moyennes peut réduire les fluctuations. Ce constat est le principal handicap de la méthode adoptée pour fixer les paramètres des contrôleurs.

Par ailleurs, il est clair que l'admissibilité de l'objectif de la commande locale dépend également des valeurs des paramètres estimés. En effet, en gardant les valeurs calculées précédemment et en augmentant la demande à $d = 0.8$ produits par unité de temps, nous constatons une détérioration de la performance du suivi (Cf. Figure 2.44.a).

La Figure 2.44.b illustre l'évolution de la production et la demande cumulée en appliquant les paramètres calculés pour $d = 0.8$ (Cf. Tableau 2.5). Dans ce cas, la performance de suivi est satisfaisante.

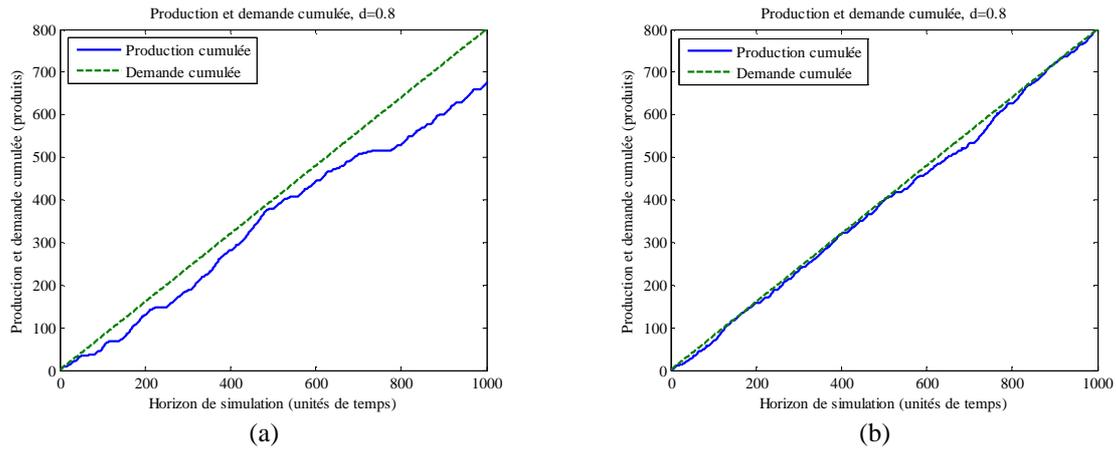


Figure 2.44 : Production et demande cumulées dans le cas: (a) paramètres pour $d=0.7$, (b) paramètres pour $d=0.8$.

Tableau 2.5 : Paramètres des modules de contrôles flous pour $d = 0.8$.

i	F_i^r	F_i^b	z_i^r	z_i^b	x_i^{\max}	z_i
1	0.00	0.36	1.60	0.00	2	6.72
2	0.00	0.15	1.25	2.67	5	5.12
3	0.20	0.00	2.68	2.54	6	3.87
4	0.25	0.00	-	-	-	1.20

Enfin, dans le but d'évaluer la robustesse de la commande floue vis-à-vis des changements de la demande (sous le respect de sa faisabilité), nous illustrons sur la Figure 2.45 l'évolution de la production cumulée pour un horizon de planification divisé en 4 périodes de longueur non identiques et pendant lesquelles la demande est constante (Cf. Tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Planification des demandes sur l'horizon de production.

Taux de demande (Produit/unité de temps)	Périodes (unités de temps)
0.7	[0, 350[
0.1	[350, 650[
0.5	[650, 800[
0.7	[800, 1000]

Les performances de suivi de trajectoire pour les différentes périodes sont données sur la Figure 2.45.

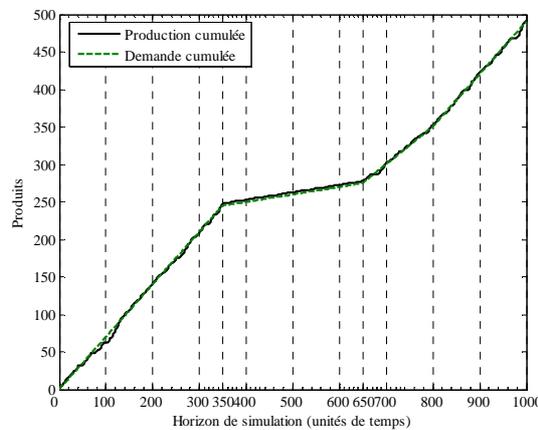


Figure 2.45 : Production cumulée pour différentes demandes constantes par période.

9. Généralisation de la structure de commande locale

Dans le cas général d'un système de production composé de N modules de production élémentaires (transformation, assemblage et/ou désassemblage), l'architecture globale de contrôle est illustrée sur la Figure 2.46.

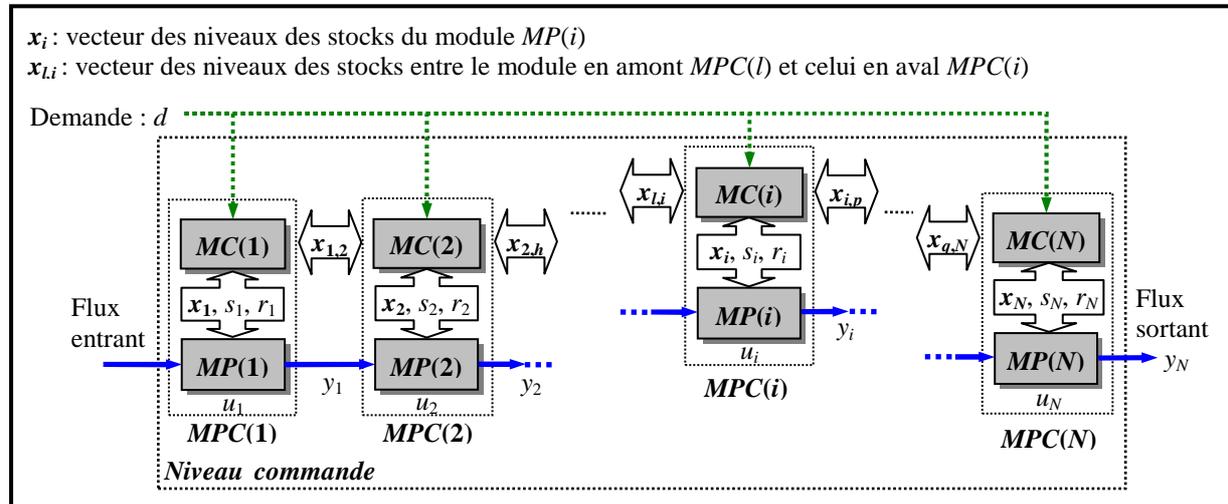


Figure 2.46 : Architecture de contrôle locale.

Bien que la stratégie de pilotage décrite dans ce chapitre est synthétisée pour un système de production mono-produit avec des modules de transformation, elle reste transposable pour des systèmes intégrant des modules d'assemblage et/ou de désassemblage et dans le cas multi-produit. Ces différents aspects sont illustrés sur des cas applicatifs dans le Chapitre 4.

Toutefois, dans ce type d'architecture, la vision locale du pilotage ne permet pas toujours d'anticiper suffisamment les perturbations relatives à l'environnement du système (fluctuation des demandes, pannes aux extrémités du point de contrôle, etc.). En effet, chaque module de production contrôlé MPC est en interaction avec ses modules voisins via les stocks intermédiaires. La communication entre modules, n'ayant pas de lien direct, s'effectue par propagation d'information, de proche en proche, ce qui peut être relativement lent dans le cas de systèmes larges à forte densité de produits.

Par ailleurs, les objectifs de production sont généralement évalués en termes d'indicateurs de performance globaux qui ne sont pas pris en compte explicitement dans le contrôle local. En effet, il est établi que la satisfaction des objectifs locaux n'implique pas forcément le respect des objectifs globaux. De plus, l'aspect conflictuel des objectifs de production (par exemple, la réduction des retards en production peut se faire au détriment d'un encours plus élevé), nécessite un mécanisme capable de générer des décisions en cohérence avec les actions locales. Partant de ces faits, un niveau de supervision est nécessaire pour remédier à ce type de problème. C'est l'objectif du Chapitre 3 où une méthodologie de supervision est proposée.

10. Conclusion

Après avoir défini dans le premier chapitre le modèle fluide pour l'analyse et la simulation des systèmes de production, nous avons abordé ici la problématique de pilotage des flux. Une analyse des différentes typologies de pilotage a été menée pour définir celle qui s'adapte le mieux à nos besoins. Nous avons alors déduit qu'une organisation supervisée et modulaire

permet de gérer au mieux les niveaux « supervision » et « commande locale ». Ainsi, ce chapitre a été entièrement dédié au développement d'une stratégie de pilotage au niveau « commande locale ».

Pour cela, en s'appuyant d'une part sur le modèle fluide et d'autre part sur l'état de l'art des méthodes existantes de contrôle des flux, nous avons discuté et justifié le choix d'un pilotage à base de surplus. Ce choix est essentiellement guidé par un désir d'exploiter des techniques de commande issues de l'automatique des systèmes continus afin d'aborder le pilotage local sous forme d'un problème de poursuite de trajectoires.

A cet effet, en considérant la décomposition du système en modules de production élémentaires, nous avons procédé en premier lieu à l'analyse des différentes approches de contrôle à base de surplus afin de dégager les idées directrices. Ainsi, un intérêt particulier a été porté au problème d'allocation de capacité de production via la politique du point d'hésitation.

Compte tenu des difficultés de représentation et de synthèse liées aux approches analytiques existantes, nous nous sommes orientés vers des techniques, plus simple et mieux adaptées à notre problème, issues de l'intelligence artificielle. Particulièrement, nous avons justifié, décrit, synthétisé et validé notre approche de commande locale floue.

Dans le chapitre suivant, la problématique de la supervision dans le pilotage des flux est traitée.

CHAPITRE 3

Sur la supervision dans le pilotage des flux de production

Chapitre 3 :

Sur la supervision dans le pilotage des flux de production

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons le niveau de supervision dans l'architecture de pilotage adoptée. La structure de supervision que nous proposons consiste à augmenter la loi de commande locale par une composante additive. Cette dernière est synthétisée selon un mécanisme intégrant un processus décisionnel afin de réaliser les performances globales du système (objectifs spécifiés).

Ainsi, une approche basée sur des mécanismes d'agrégation (agrégation par règles floues et agrégation par opérateurs mathématiques) est développée pour élaborer la composante additive du superviseur. Dans ce cas, l'action du superviseur consiste soit à allouer de la capacité restante soit à réduire le flux de production au niveau de chaque module de production. La synthèse de la loi de supervision est alors fonction d'une part, de la commande locale qui renseigne le superviseur sur la capacité restante sur chaque module de production et d'autre part, des performances globales par rapport aux objectifs fixés. Ces performances indiquent au superviseur le mode de fonctionnement actuel du système (normal ou dégradé).

Dans la synthèse du superviseur, nous mettons l'accent sur l'importance de la forme de représentation des objectifs de production. Nous proposons pour cela une représentation à base d'intervalles (conventionnels et flous). Ces derniers constituent le référent des performances évaluées afin de décider de l'action à appliquer au niveau opérationnel.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans le paragraphe suivant, nous posons la problématique de supervision afin de dégager la structure qui s'adapte le mieux à notre étude. Ensuite, nous rappelons les indicateurs de performance les plus pertinents dans une problématique de gestion des flux de production et nous délimitons les valeurs souhaitées de ces indicateurs, caractérisant le mode de fonctionnement normal (objectifs), par des intervalles. Dans la quatrième section, nous détaillons la méthodologie de conception du superviseur à travers les formalismes d'agrégation adoptés. Dans ce contexte, deux alternatives sont proposées. La première est basée sur l'agrégation des actions relatives à chaque performance, tandis que la seconde consiste à agréger les performances et les objectifs pour ensuite élaborer l'action de supervision.

Pour chaque mécanisme de supervision proposé, le même exemple illustratif est décliné afin d'évaluer sa faisabilité ainsi que ses performances par rapport au cas non supervisé.

2. Problématique de la supervision

Dans une architecture de pilotage distribuée-supervisée, le rôle de la supervision est de coordonner les interactions entre les contrôleurs locaux. En effet, en fonction d'un certain nombre d'indicateurs de performance, le superviseur vise à optimiser le comportement du système afin de l'amener à réaliser de bonnes performances en présence des aléas de fonctionnement.

Compte tenu de la représentation des flux par modèle fluide, une approche de supervision continue nous paraît particulièrement pertinente dans le cadre de notre étude. En effet, la supervision continue permet :

- d'assurer la cohérence entre les différentes actions élaborées à chaque niveau de pilotage (la commande locale et la supervision),
- d'adapter des formalismes issus de la théorie de décision, capables de gérer des objectifs antagonistes, des conflits et des décisions multicritères.

Dans la littérature relative à la théorie des systèmes continus, la notion de supervision définit tout organe ou contrôleur manipulant des informations globales, caractérisant l'évolution actuelle du système, capable de reconfigurer et d'adapter la commande locale si cela s'avère nécessaire (mode de fonctionnement dégradé), afin de garantir le respect des spécifications et des objectifs désirés [Passino and Yurkovish, 1998 ; Montmain and Gentil, 2000 ; Gentil and Montmain, 2004]. Dans ce contexte, nous distinguons deux méthodologies pour la conception du superviseur : supervision par adaptation et modification de la commande locale et supervision par ajout d'une composante à la commande locale.

2.1. Supervision par adaptation et modification de la commande locale

Dans ce mode de supervision, l'action du superviseur consiste à modifier (ou reconfigurer) la structure de la commande locale en adaptant les paramètres et/ou la structure des contrôleurs locaux en fonction des informations globales du système. Pour un module de production élémentaire $MP(i)$, le principe de cette stratégie de supervision est illustré sur la Figure 3.1.

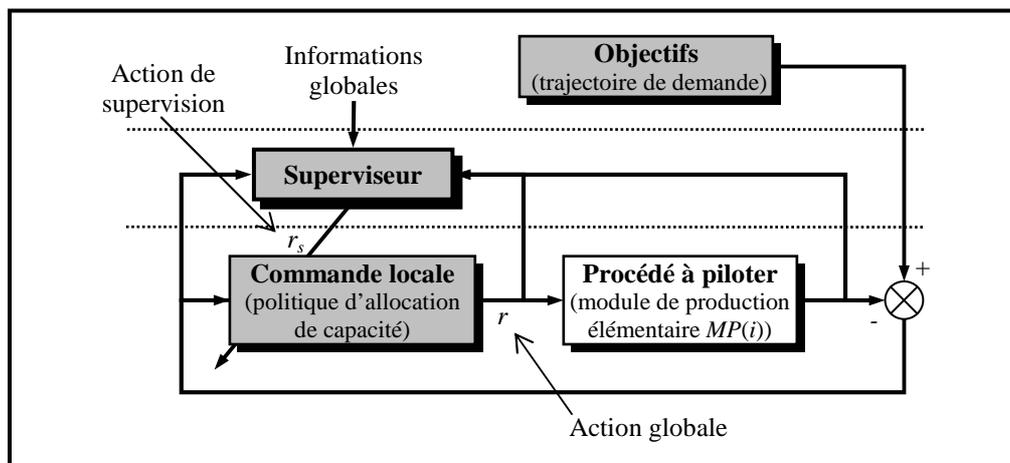


Figure 3.1 : Structure de supervision par reconfiguration de commande locale.

A titre d'exemple, on peut citer l'approche de supervision floue développée dans [Ioannidis et al., 2004] pour piloter les lancements de la production. Les auteurs adoptent un pilotage à base de surplus et synthétisent un superviseur flou pour adapter les bornes du domaine de fonctionnement admissible pour le surplus (modification de l'univers de discours du surplus). Dans la continuité de ces travaux, Tsourveloudis et al. [Tsourveloudis et al., 2007] proposent d'améliorer la structure du superviseur en adaptant, en plus des bornes du surplus, le nombre et la forme des fonctions d'appartenance des entrées des contrôleurs flous via des techniques évolutionnistes (modification de la structure du système).

On peut citer également l'approche hiérarchique proposée dans [Vargas-Villamil et al., 2003] pour l'ordonnancement et la planification des flux dans le contexte des systèmes de production de semi-conducteurs. Le superviseur est basé sur l'utilisation de la commande

prédictive à base de modèles (model predictive control MPC) qui permet d'optimiser la productivité du système et piloter les encours. A partir des performances optimales calculées par le superviseur, les règles de priorités sur les stocks au niveau local sont alors modifiées.

2.2. Supervision par ajout de composante à la commande locale

Dans ce mode de supervision, l'action du superviseur vise à augmenter la commande locale par une composante additive sans modifier la structure et/ou la configuration du contrôleur local. En effet, dans le cas où les performances de la commande locale s'avèrent insuffisantes, le superviseur élabore une action pour compenser le dysfonctionnement du système. Cette action du superviseur doit être cohérente avec la commande locale. En d'autres termes, cette action est appliquée lorsque le système contrôlé quitte la zone de fonctionnement admissible et désirée. Ce mode de supervision fait appel à un mécanisme de commutation entre les différents modes de fonctionnement du système afin de décider de l'instant d'application de l'action de supervision. Une illustration de ce principe sur un module de production $MP(i)$ avec une action additive r_s est donnée sur la Figure 3.2.

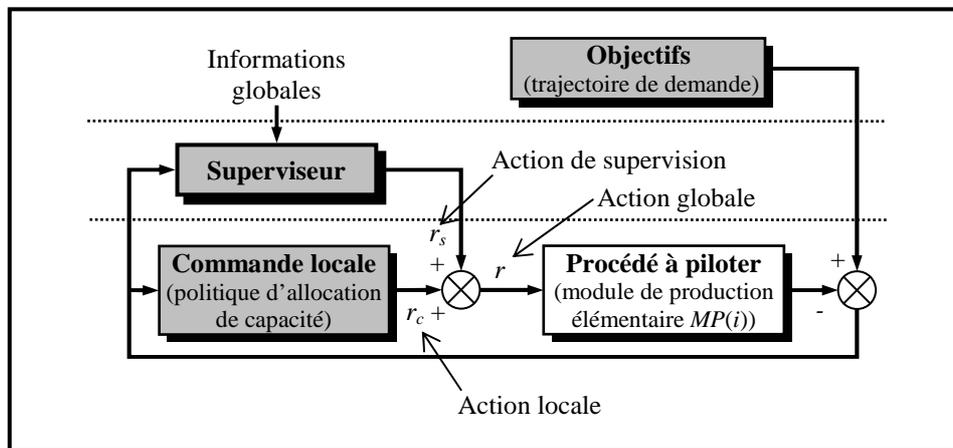


Figure 3.2 : Structure de supervision par composante additive.

A titre d'exemple, nous citons les travaux de Wang [Wang, 1994] qui, quoique développés dans le cadre de la supervision des systèmes flous, restent facilement généralisables sur des systèmes de production fluides. La méthodologie de supervision proposée repose sur l'augmentation de commande locale notée $r_c(t)$ par une composante additive dite « loi de supervision » $r_s(t)$ afin de garantir les performances globales désirées (fonctionnement normal). La commande finale appliquée au système s'écrit alors comme suit :

$$r(t) = \begin{cases} r_c(t) & , \text{ si fonctionnement normal} \\ r_c(t) + r_s(t) & , \text{ si fonctionnement dégradé} \end{cases} \quad (3.1)$$

L'action du superviseur commute entre les deux modes de fonctionnement (normal/dégradé) en fonction de la performance du système.

2.3. Discussion

D'une manière générale, l'adaptation et le changement de la structure d'un contrôleur local, souvent basés sur des algorithmes adaptatifs et/ou itératifs, présentent de sérieux problèmes en termes de stabilité et de convergence. En effet, il est préférable d'assumer une structure fixe pour le contrôleur local et de proposer une logique de supervision capable d'aider ce dernier

pendant son dysfonctionnement. C'est pourquoi nous privilégions l'utilisation de la seconde stratégie (Cf. Figure 3.2), à savoir l'augmentation de la commande locale par une composante additive sans remettre en cause la commande locale déjà élaborée. En effet, dans la synthèse de la commande locale, détaillée dans le Chapitre 2, nous avons défini les paramètres des contrôleurs locaux en fonction des paramètres fixes relatifs aux modules de production associés. Dans ce cas, modifier la structure du contrôleur reviendrait à remettre en cause la stratégie de pilotage local et la méthodologie proposée. Cette dernière est détaillée dans la suite de ce chapitre.

3. Structure de contrôle et de supervision adoptée

La méthodologie de supervision adoptée dans cette thèse repose sur l'introduction dans la structure de la commande locale d'un mécanisme de supervision qui est capable, à partir des indicateurs de performance globaux, de prendre les décisions nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système contrôlé. L'action du superviseur est déployée sous forme d'une composante additive pour garantir la cohérence des deux actions (commande locale et supervision). Pour un module de production, cette composante additive consiste à allouer la capacité restante ou à réduire sa cadence de production.

D'un point de vue conception, la synthèse du superviseur s'articule autour des deux étapes suivantes :

1. La définition et la représentation des indicateurs de performance capables d'évaluer les objectifs de production.
2. La conception d'un mécanisme d'agrégation capable d'élaborer une composante additive cohérente avec la commande locale et assurant les performances spécifiées.

3.1. Définition et représentation des indicateurs de performance

Dans le contexte du pilotage des flux de production, les indicateurs de performance doivent être choisis de telle sorte que les différentes facettes des performances soient couvertes [Berrah, 1997 ; Ait Hssain, 2000]. Parmi celles-ci nous citons à titre d'exemple :

- Débit de la production : le débit des produits en sortie du système de fabrication peut être évalué à partir d'indicateurs tels que le taux de production (nombre de pièces produites par unité de temps), ou encore le temps de cycle (temps séparant deux sorties successives de produits). Cet aspect de performance donne des informations sur la réactivité ou la productivité du système (throughput). Dans notre contexte, le taux de production est fixé par la variable de contrôle (commande locale) pour réguler la production.
- Fluidité des flux : la fluidité exprime l'accumulation des produits dans le système. Elle peut être évaluée en utilisant des indicateurs comme le niveau des stocks et des encours (in-process inventory ou WIP : Work-In-Process) et le temps de production (manufacturing lead time). Ce dernier indique la différence entre l'instant où le produit quitte le système et l'instant où il a été introduit dans le système. On parle aussi de délai de fabrication ou temps de séjour. Dans le cadre de cette étude, ces deux indicateurs peuvent être exploités pour fixer les objectifs globaux.
- Satisfaction de la demande : cet aspect traduit la qualité du service par rapport à une demande exprimée par le nombre de produits commandés par unité de temps, ou encore

le nombre de pièces brutes lancées par unité de temps. Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer le degré de satisfaction d'une demande, par exemple : le surplus final, le retard de livraison, le temps d'attente des demandes, le nombre de demandes en attente, etc. Ici, un intérêt tout particulier est porté sur la performance du surplus final étant donné qu'il constitue le fondement de l'approche de pilotage proposée.

- Disponibilité des ressources : elle s'exprime en fonction de la capacité maximale des ressources. Une meilleure disponibilité traduit par exemple l'efficacité de la maintenance, des changements d'outils et réglages, etc. Pour évaluer cette performance, on peut utiliser le taux d'utilisation des ressources qui indique le pourcentage de temps passé par la machine dans l'état de fabrication. Les autres états pouvant être en panne, en réparation, blocage/rupture, etc. Cette performance nous a servi dans l'estimation des taux de rupture et de blocage dans la conception de la commande locale.

Dans ce travail de thèse, quels que soient les indicateurs de performance utilisés, leur représentation est essentiellement liée aux domaines (ou intervalles) de tolérance des objectifs associés. Ces objectifs regroupent l'ensemble des valeurs qui définissent le domaine de fonctionnement normal et souhaité du système considéré et dont la quantification fait souvent appel aux connaissances expertes [Grabot et al., 1996 ; Clivillé, 2004].

Ainsi, pour chaque indicateur de performance P_l nous associons un domaine de fonctionnement ou un domaine de tolérance souhaitable P_l^{obj} , défini par un intervalle comme suit :

$$P_l^{\text{obj}} = [(P_l^{\text{obj}})^-, (P_l^{\text{obj}})^+] \quad (3.2)$$

où $(P_l^{\text{obj}})^-$ et $(P_l^{\text{obj}})^+$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle P_l^{obj} . Dans ce cas, pour une mesure sur l'indicateur de performance P_l , la relation $P_l \in P_l^{\text{obj}}$ signifie que la performance associée à cet indicateur est satisfaisante (fonctionnement en mode normal). Dans le cas contraire, une dérive dans le fonctionnement du système est constatée (fonctionnement en mode dégradé). Ce principe est illustré sur la Figure 3.3.

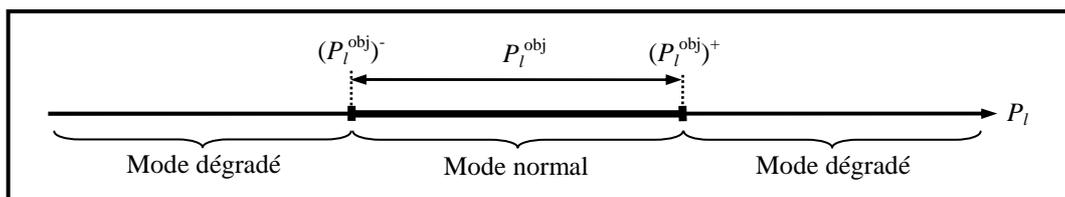


Figure 3.3 : Intervalle de tolérance d'un indicateur de performance P_l .

3.2. Principe de conception d'un superviseur

Pour la conception du superviseur, un certain nombre d'informations relatives à la fois au niveau local et au niveau global sont exploitées. Ainsi, en considérant un module de production $MP(i)$, les informations nécessaires à l'élaboration de l'action de supervision sont :

- la commande locale, notée dans ce chapitre, $r_c(t)$,
- l'état de l'ensemble des indicateurs de performance globaux considérés $P_l, l = 1, \dots, L$,
- les domaines de tolérance des indicateurs de performance, c'est-à-dire les objectifs $P_l^{\text{obj}}, l = 1, \dots, L$ à atteindre pour ces indicateurs.

Ainsi, en fonction des mesures associées aux indicateurs de performance considérés P_1, \dots, P_L et de la commande locale $r_{c_i}(t)$, le superviseur décide pour chaque module de production $MP(i)$ de la pertinence d'une action additive $r_{s_i}(t)$ conformément au mode de fonctionnement du système. Cette composante additive est alors conçue par une fonction générique de la forme suivante :

$$r_{s_i}(t) = S(P_1, \dots, P_L, r_{c_i}(t)) \quad (3.3)$$

où S est la fonction implantant le mécanisme de décision pour l'élaboration de la composante de supervision. La méthodologie de conception de la fonction S est détaillée dans les paragraphes suivants. Finalement, en tenant compte de l'action du superviseur, la loi de commande globale $r_i(t)$ à appliquer à chaque module de production élémentaire $MP(i)$ est alors donnée par l'expression suivante (Cf. Figure 3.4) :

$$r_i(t) = r_{c_i}(t) + r_{s_i}(t) \quad (3.4)$$

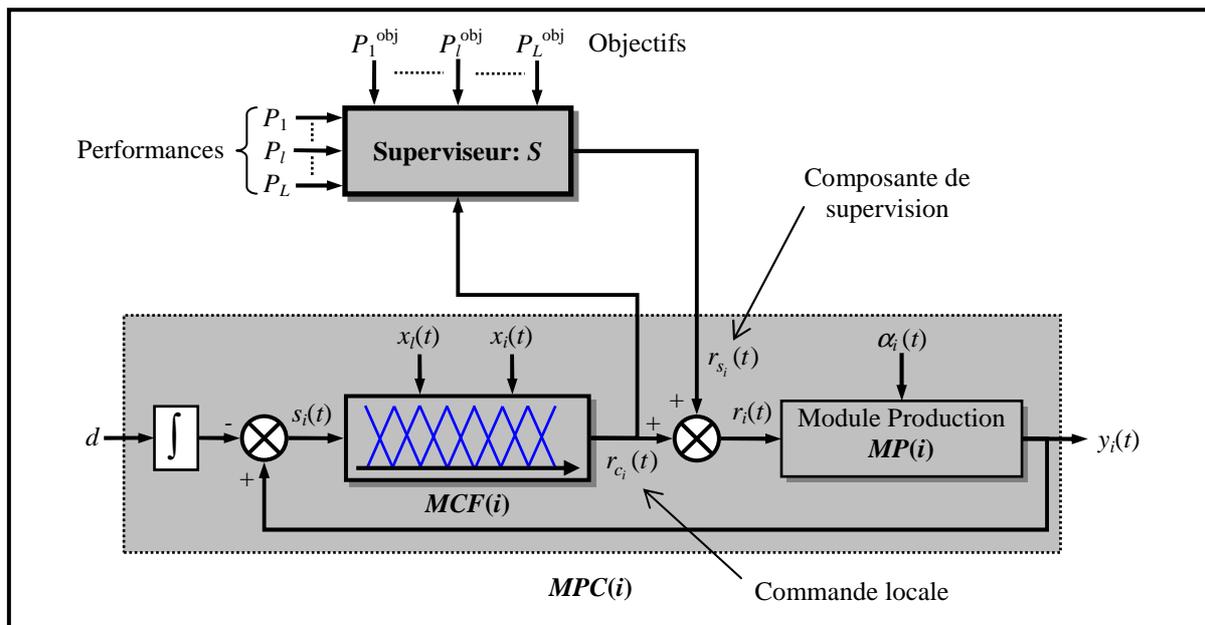


Figure 3.4 : Schéma de principe de la supervision par composante additive d'un $MP(i)$.

Pour un système à N modules de production élémentaires $MP(i)$ le superviseur élabore, en fonction de l'ensemble des indicateurs globaux P_1, \dots, P_L et du vecteur des commandes locales $r_c(t) = [r_{c_1}(t), \dots, r_{c_N}(t)]^T$, le vecteur des N composantes de supervision $r_s(t) = [r_{s_1}(t), \dots, r_{s_N}(t)]^T$, chacune étant destinée au module de production correspondant (Cf. Figure 3.5).

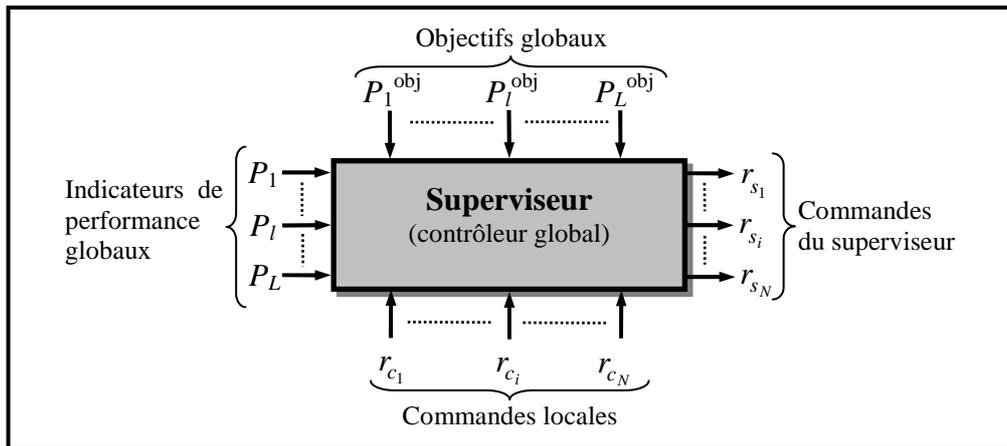


Figure 3.5 : Les entrées-sorties du superviseur.

L'insertion de ce superviseur dans le schéma de commande distribuée donné dans le chapitre 2, conduit à une architecture de contrôle distribuée-supervisée comme illustrée sur la Figure 3.6.

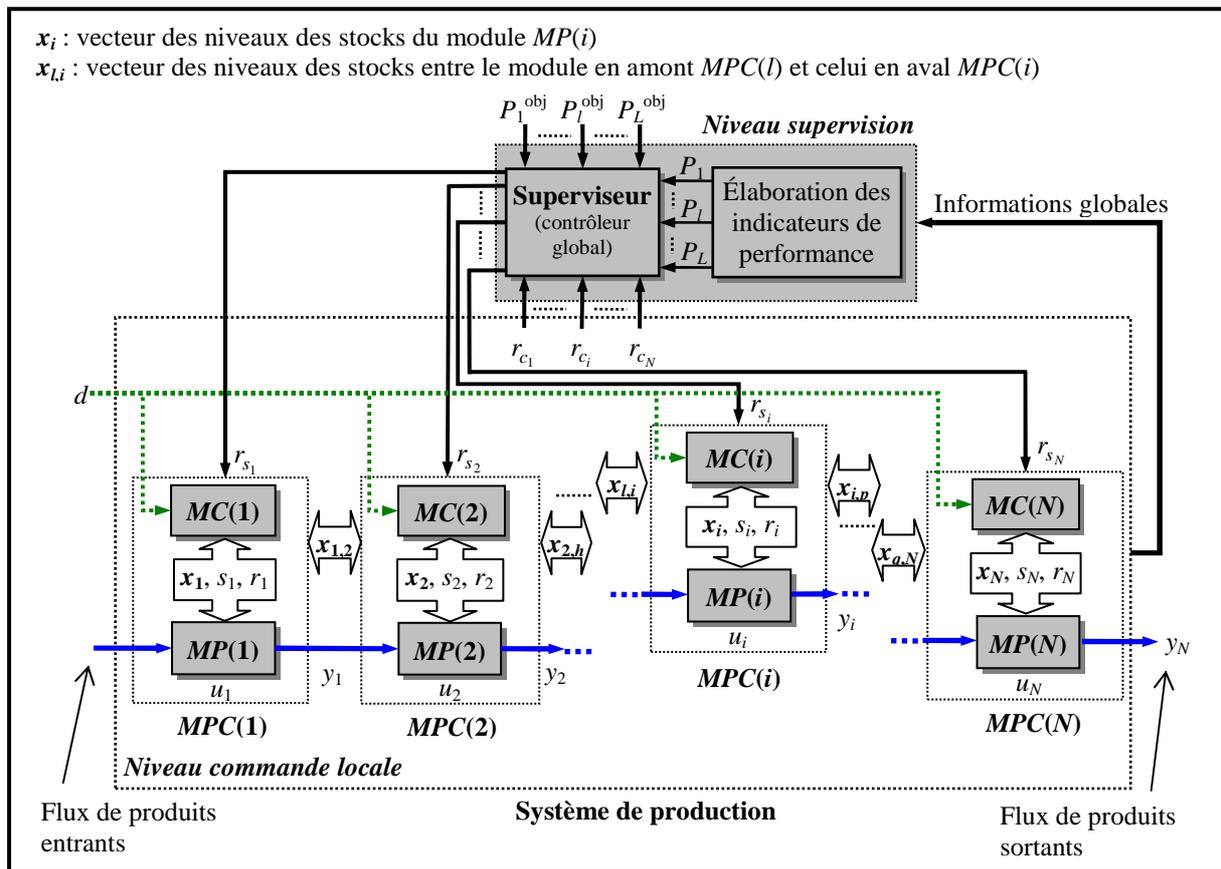


Figure 3.6 : Architecture de pilotage globale adoptée.

Compte tenu de la complexité des systèmes considérés, la conception du superviseur s'appuie pour une grande part sur l'expertise humaine.

4. Méthodologie de conception du superviseur

Dans la littérature, plusieurs méthodologies ont été proposées pour la supervision des systèmes complexes. Plus précisément, des formalismes issus de l'intelligence artificielle ont été adoptés pour décrire la relation entrées-sorties S du superviseur. A titre d'exemple, on peut citer les stratégies basées sur l'agrégation par règles floues (systèmes flous) développées dans [Passino and Yurkovish, 1998 ; Ioannidis et al., 2004]. Néanmoins, à notre connaissance peu de travaux existent sur l'exploitation des opérateurs d'agrégation dans la supervision des systèmes de production. Dans cette thèse, pour la conception du superviseur, nous nous intéressons à deux approches d'agrégation à savoir : approche par règles floues et approche par opérateurs d'agrégation.

4.1. Superviseur à base d'agrégation par règles floues

4.1.1. Principe

La synthèse du superviseur est vue comme la conception d'un système flou qui, à partir des informations sur les indicateurs de performance P_1, \dots, P_L et les commandes locales $r_{c_1}(t), \dots, r_{c_N}(t)$, est capable d'implanter la relation S (Cf. équation (3.3)) par des règles floues [Tamani et al., 2007a].

La démarche de supervision développée ici s'inspire des travaux de Ioannidis et al. [Ioannidis et al., 2004]. Les auteurs proposent une méthodologie de supervision fondée sur la modification de la structure et des paramètres des contrôleurs locaux. En ce sens, le superviseur repose sur l'adaptation, sur chaque contrôleur, des bornes admissibles (univers de discours) du surplus local en fonction des performances du surplus final et de l'encours. En particulier, en considérant les actions des contrôleurs associées aux ressources d'entrées du système, le superviseur agit sur les lancements de production pour limiter le flux des produits dans le système et réduire ainsi les encours. Toutefois, il est important d'insister sur le fait que cette méthodologie ne prend pas en compte la dynamique des flux internes du système du fait que le superviseur ne considère que des informations globales (surplus final, encours). Cette vision du contrôle ne permet pas de détecter par exemple des goulets d'étranglement et d'anticiper la propagation d'une perturbation à l'intérieur du système. Au Chapitre 4, nous reviendrons sur l'approche développée dans [Ioannidis et al., 2004] à des fins de comparaison.

Bien que la stratégie de supervision proposée dans [Ioannidis et al., 2004] repose sur la modification de la structure du contrôleur local, l'idée directrice sous-jacente peut être exploitée dans une vision de supervision par ajout de composante additive. En effet, dans la conception de cette dernière, nous proposons d'intégrer, en plus des indicateurs de performance globaux, la commande locale pour construire la base de règles du superviseur, ce qui permet de considérer la capacité allouée sur chaque module de production [Tamani et al., 2007a]. Cette conception s'appuie sur l'expertise humaine afin de gérer au mieux l'aspect conflictuel entre les performances en relation avec les préférences du décideur.

Dans la construction du système flou, les intervalles de tolérance P_l^{obj} des indicateurs de performance représentent leurs univers de discours. Sur chaque univers de discours un nombre de symboles flous (sous-ensembles flous) est défini pour représenter la signification floue de l'indicateur utilisé. Dans notre cas, en cohérence avec la représentation de la Figure 3.3, trois symboles flous sont utilisés pour décrire l'indicateur P_l , à savoir : « Retard », « Satisfaisant » et « Excès » (Cf. Figure 3.7.a).

Sachant que la commande locale est introduite comme entrée du superviseur et afin de prendre en considération sa dynamique par rapport à l'allocation de la capacité maximale, un partitionnement symétrique en 5 symboles flous est choisi. Dans ce partitionnement, les valeurs modales de ces symboles flous représentent les différentes conclusions constantes du contrôleur flou local définies dans le Chapitre 2 (Cf. Figure 3.7.b).

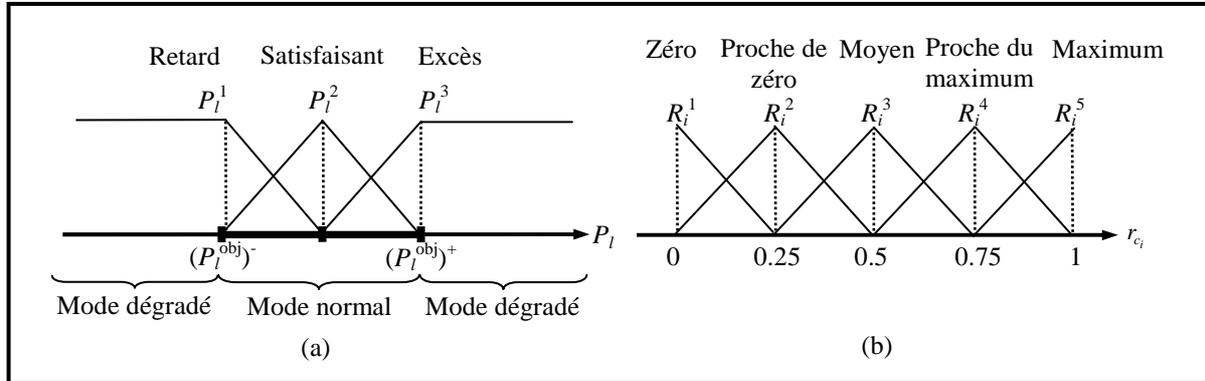


Figure 3.7 : Partitionnement des univers de discours : (a) indicateur global P_i , (b) loi de commande locale r_{c_i} .

La relation (2.3), qui fournit le taux de production du module $MP(i)$ en fonction de la commande globale $r_i(t)$ donnée par (3.4), s'exprime dans ce cas comme suit :

$$u_i(t) = r_i(t)u_i^{\max} = [r_{c_i}(t) + r_{s_i}(t)] \cdot u_i^{\max} \quad (3.5)$$

La composante additive issue du superviseur agit soit en allouant de la capacité restante sur le module $MP(i)$ si un retard sur les objectifs est constaté, soit en diminuant sa cadence de production si un important excédent sur les objectifs est mesurée. L'expression de cette composante additive est alors donnée par :

$$r_{s_i}(t) = \rho_i(t)(1 - r_{c_i}(t)) - \gamma_i(t)r_{c_i}(t) \quad (3.6)$$

où $r_{c_i}(t) \in [0, 1]$.

Dans l'équation (3.6), les paramètres $\rho_i(t) \in [0, 1]$ et $\gamma_i(t) \in [0, 1]$ représentent les deux facteurs générés par le système flou pondérant respectivement la capacité restante et la capacité allouée par le contrôleur local $MCF(i)$. Ces facteurs sont alors déterminés par le superviseur en fonction des indicateurs de performance et de la commande locale en concordance avec les principes suivants :

- Si les performances globales du système sont satisfaisantes, c'est-à-dire, tous les indicateurs P_i sont à l'intérieur de leurs intervalles de tolérance (système en mode normal) ou la capacité restante est nulle (commande locale maximale), alors $\rho_i(t) = 0$ et $\gamma_i(t) = 0$. Dans ce cas, le superviseur n'introduit pas de composante additive.
- Si les performances de production sont insuffisantes par rapport aux objectifs, c'est-à-dire que tous les indicateurs P_i sont en dessous des bornes inférieures de leurs intervalles de tolérance (retard par rapport à l'objectif spécifié) et qu'il reste de la capacité, alors $\rho_i(t) =$

1 et $\gamma_i(t) = 0$. Dans ce cas, le superviseur alloue le maximum de la capacité restante au module $MP(i)$, *i.e.*, $r_{s_i}(t) = 1 - r_{c_i}(t)$.

- Si les performances de production sont en excès par rapport aux objectifs, autrement dit, tous les indicateurs P_l sont au dessus des bornes supérieures de leurs intervalles de tolérance, alors $\rho_i(t) = 0$ et $\gamma_i(t) = 1$. Dans ce cas, le superviseur génère une composante pour stopper la production du module $MP(i)$, *i.e.*, $r_{s_i}(t) = -r_{c_i}(t)$.
- Si différentes situations pour la performance des indicateurs sont constatées (satisfaction pour les uns et dégradation pour les autres), un compromis est réalisé à travers les règles floues selon les préférences spécifiées.

Afin de déterminer les deux facteurs de pondérations $\rho_i(t)$ et $\gamma_i(t)$, la stratégie choisie consiste à utiliser deux bases de règles distinctes. Sachant que ces règles dépendent des mêmes informations des prémisses (indicateurs de performance globaux et commandes locales), alors les mêmes structures de base de règles sont utilisées et seules les valeurs de conclusion diffèrent.

Ainsi, pour rester homogène avec la stratégie de la commande locale, des systèmes flous de type Takagi-Sugeno à conclusions constantes sont utilisés.

Si on considère les N commandes locales $r_{c_1}(t), \dots, r_{c_N}(t)$ et les mesures des L indicateurs de performance P_1, \dots, P_L , le système flou est représenté par une collection de règles de la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{Si } P_1 \text{ est } P_1^{i_1} \text{ et } \dots \text{ et } P_L \text{ est } P_L^{i_L} \text{ et } r_{c_1} \text{ est } R_1^{i_{L+1}} \text{ et } \dots \text{ et } r_{c_N} \text{ est } R_N^{i_{L+N}} \text{ alors} \\ \rho_1 = \phi_{\rho_1}^{(i_1, \dots, i_{L+N})} \text{ et } \dots \text{ et } \rho_N = \phi_{\rho_N}^{(i_1, \dots, i_{L+N})} \text{ et } \gamma_1 = \phi_{\gamma_1}^{(i_1, \dots, i_{L+N})} \text{ et } \dots \text{ et } \gamma_N = \phi_{\gamma_N}^{(i_1, \dots, i_{L+N})} \end{aligned} \quad (3.7)$$

où $\phi_{\rho_i}^{(i_1, \dots, i_{L+N})}$, $\phi_{\gamma_i}^{(i_1, \dots, i_{L+N})}$, pour $i = 1, \dots, N$ sont respectivement deux constantes réelles dans la conclusion de la règle (3.7).

Les systèmes flous utilisés (équation (3.7)) sont des systèmes multi-entrées, multi-sorties (MIMO) avec $L+N$ entrées et $2N$ sorties. Pour des raisons de simplicité et d'efficacité dans l'implantation, ces systèmes peuvent être représentés par une collection de $2N$ systèmes flous multi-entrées mono-sortie (MISO), chacun est de la forme suivante (Cf. Figure 3.8) :

$$\text{Si } P_1 \text{ est } P_1^{i_1} \text{ et } \dots \text{ et } P_L \text{ est } P_L^{i_L} \text{ et } r_{c_i} \text{ est } R_i^{i_{L+1}} \text{ alors } \rho_i = \phi_{\rho_i}^{(i_1, \dots, i_{L+1})}; i = 1, \dots, N \quad (3.8)$$

et

$$\text{Si } P_1 \text{ est } P_1^{i_1} \text{ et } \dots \text{ et } P_L \text{ est } P_L^{i_L} \text{ et } r_{c_i} \text{ est } R_i^{i_{L+1}} \text{ alors } \gamma_i = \phi_{\gamma_i}^{(i_1, \dots, i_{L+1})}; i = 1, \dots, N \quad (3.9)$$

Dans ce cas, les sorties globales des systèmes flous (3.8) et (3.9) sont déterminées en exploitant le mécanisme de Sugeno donné dans le Chapitre 2 (Cf. équation (2.18)).

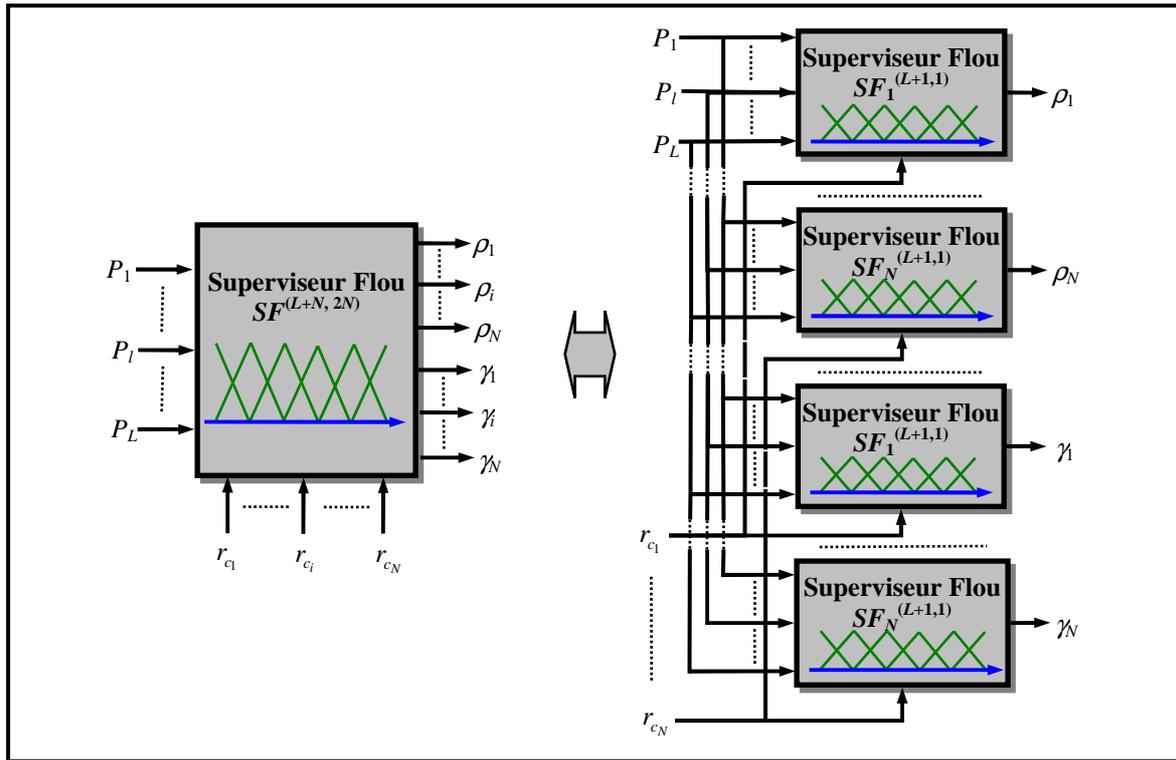


Figure 3.8 : Représentation du superviseur flou MIMO par une collection de systèmes MISO.

4.1.2. Exemple illustratif

Afin d'illustrer la méthodologie de supervision proposée, nous reprenons l'exemple de la ligne de transformation à 4 modules contrôlés avec un taux de demande $d = 0.7$ produits par unité de temps, traité dans le précédent chapitre (Cf. Chapitre 2, Figure 2.36). Cet exemple sera exploité tout au long de ce chapitre en conservant la même configuration.

A. Définition des indicateurs de performance

Dans la conception du superviseur, les indicateurs de performance globaux suivants sont considérés [Ioannidis et al., 2004] :

- P_1 : le surplus final moyen noté $\bar{s}_F(t_n)$ qui correspond à la moyenne au cours du temps du surplus $s_4(t_n)$ du module $MP(4)$,
- P_2 : le surplus final instantané noté $s_F(t_n)$,
- P_3 : l'encours global WIP (*Work-In-Process*) donné par :

$$WIP(t_n) = \sum_{i=1}^3 [x_i(t_n) + u_i(t_n)\delta t_n] \tag{3.10}$$

L'encours global est calculé sur la base des niveaux actuels des stocks intermédiaires (premier terme de la relation (3.10)) et les produits en cours de transformation sur chaque module (le deuxième terme de (3.10)).

Les objectifs spécifiés pour chaque indicateur performance, traduisant les univers de discours des indicateurs P_1 , P_2 et P_3 (les intervalles de tolérance), sont choisis comme suit :

$$P_1^{\text{obj}} = [-1, +1] ; P_2^{\text{obj}} = [-1, +1] ; P_3^{\text{obj}} = [3, 6]$$

Les partitions floues associées aux indicateurs de performance et à la commande locale sont illustrées respectivement sur la Figure 3.7.a et la Figure 3.7.b.

B. Construction du superviseur flou

Les indicateurs P_1 et P_2 sont utilisés dans le but d'améliorer la performance du surplus et du retard total en production tandis que l'indicateur P_3 permet au superviseur de piloter l'encours en le maintenant à un niveau acceptable. La base des règles du superviseur est donnée sur le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Base de règles du superviseur flou.

Règles	Entrées du superviseur				Sorties du superviseur	
	P_1	P_2	P_3	r_{c_i}	ρ_i	γ_i
1	ANY	ANY	ANY	Zéro	0	0
2	Retard	ANY	ANY	Non Zéro	1	0
3	Satisfaisant	Retard	Retard	Proche de zéro	0.5	0
4	Satisfaisant	Retard	Retard	Moyen	0.75	0
5	Satisfaisant	Retard	Retard	Proche du maximum	1	0
6	Satisfaisant	Retard	Retard	Maximum	0	0
7	Satisfaisant	Retard	Satisfaisant	Proche de zéro	0.25	0
8	Satisfaisant	Retard	Satisfaisant	Moyen	0.5	0
9	Satisfaisant	Retard	Satisfaisant	Proche du maximum	0.75	0
10	Satisfaisant	Retard	Satisfaisant	Maximum	0	0
11	Satisfaisant	Retard	Excès	Proche de zéro	0	1
12	Satisfaisant	Retard	Excès	Moyen	0	0.5
13	Satisfaisant	Retard	Excès	Proche du maximum	0	0.5
14	Satisfaisant	Retard	Excès	Maximum	0	0.25
15	Satisfaisant	Satisfaisant	Retard	Proche de zéro	0.25	0
16	Satisfaisant	Satisfaisant	Retard	Moyen	0.5	0
17	Satisfaisant	Satisfaisant	Retard	Proche du maximum	0.75	0
18	Satisfaisant	Satisfaisant	Retard	Maximum	0	0
19	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	ANY	0	0
20	Satisfaisant	Satisfaisant	Excès	Proche de zéro	0	1
21	Satisfaisant	Satisfaisant	Excès	Moyen	0	0.5
22	Satisfaisant	Satisfaisant	Excès	Proche du maximum	0	0.5
23	Satisfaisant	Satisfaisant	Excès	Maximum	0	0.25
24	Satisfaisant	Excès	Retard	Proche de zéro	0.25	0
25	Satisfaisant	Excès	Retard	Moyen	0.5	0
26	Satisfaisant	Excès	Retard	Proche du maximum	0.75	0
27	Satisfaisant	Excès	Retard	Maximum	0	0
28	Satisfaisant	Excès	Satisfaisant	Non Zéro	0	0.25
29	Satisfaisant	Excès	Excès	Proche de zéro	0	1
30	Satisfaisant	Excès	Excès	Moyen	0	0.25
31	Satisfaisant	Excès	Excès	Proche du maximum	0	0.5
32	Satisfaisant	Excès	Excès	Maximum	0	0.5
33	Excès	ANY	ANY	Non Zéro	0	1

Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink avec la librairie Floulib sont illustrés en moyenne sur 10 réplifications de durée 1000 unités de temps chacune avec un pas de discrétisation $\delta t_n = 0.1$ unité de temps. Afin de montrer l'apport du superviseur dans le maintien et le suivi des objectifs spécifiés pour chaque indicateur, un comparatif avec les résultats obtenus dans le cas non-supervisé est donné.

La Figure 3.9, la Figure 3.10 et la Figure 3.11 montrent respectivement l'évolution des trois indicateurs P_1 , P_2 et P_3 par rapport à leurs intervalles de tolérance.

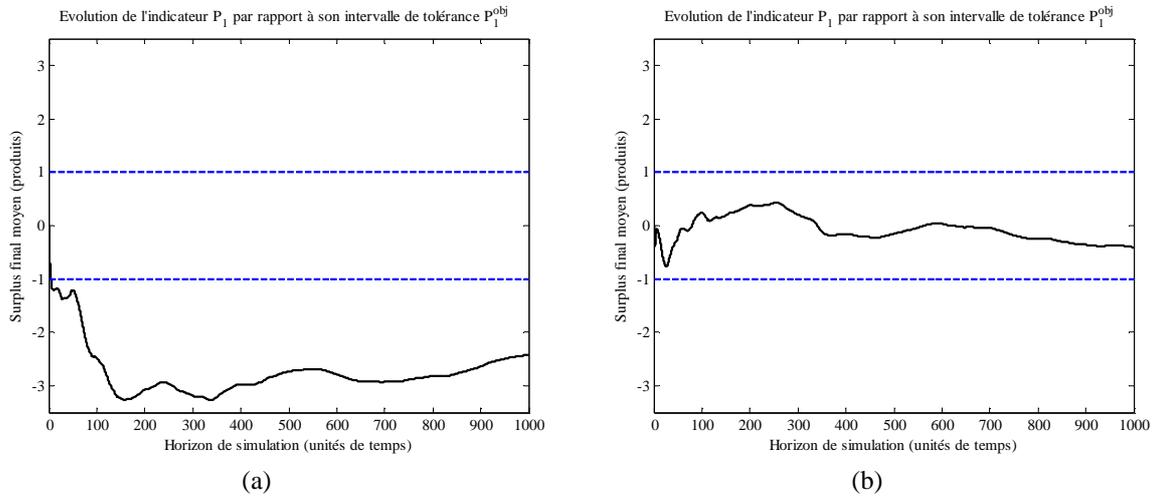


Figure 3.9 : Surplus final moyen P_1 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

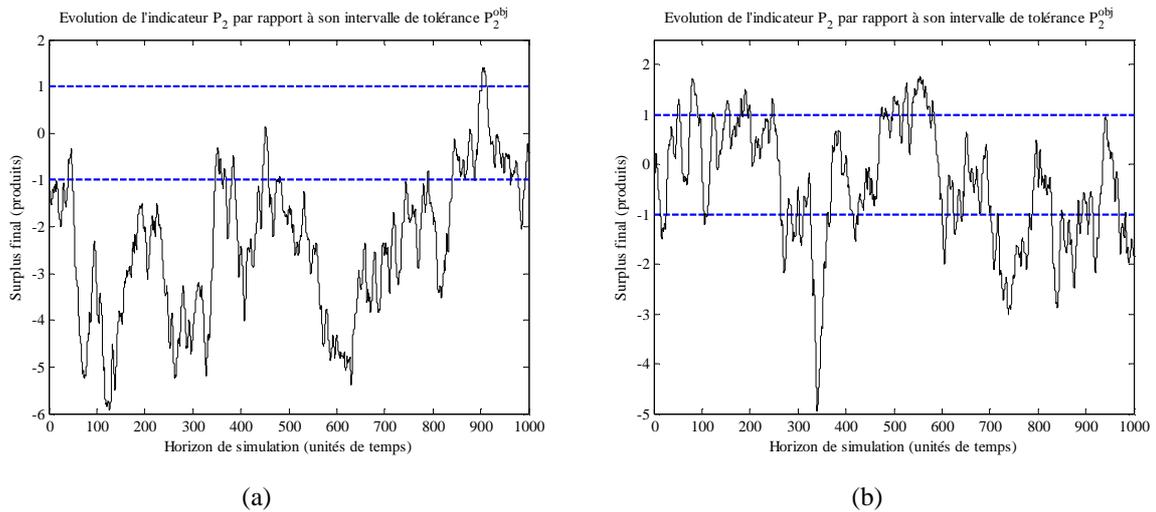


Figure 3.10 : Surplus final P_2 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

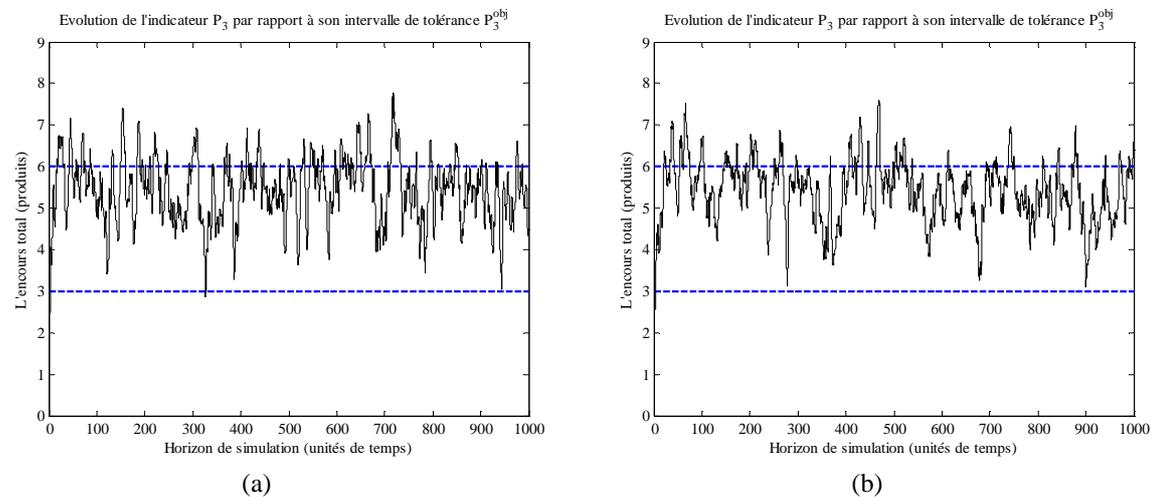


Figure 3.11 : L'encours P_3 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

La Figure 3.12.a et la Figure 3.12.b illustrent respectivement les performances en termes de retard total moyen sur la production désirée (tendance moyenne des valeurs négatives de l'indicateur P_2) et d'encours moyen (tendance moyenne de l'indicateur P_3).

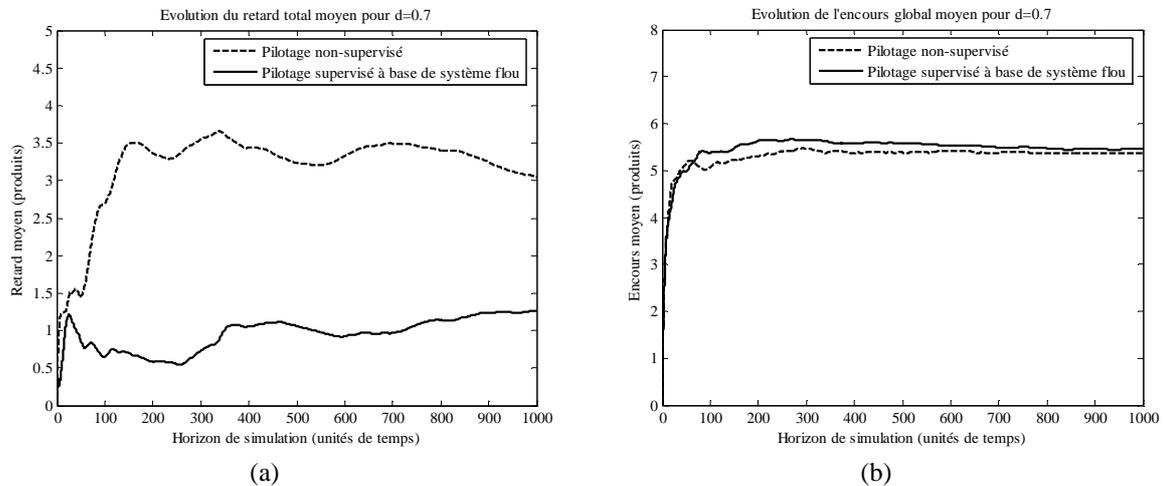


Figure 3.12 : Tendances moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.

Ces résultats montrent que, sous l'action du superviseur, le système de pilotage tend à maintenir les différents indicateurs à des niveaux acceptables (Cf. Figure 3.9, Figure 3.10 et Figure 3.11). Cette tendance a permis de réduire nettement le retard sur la production enregistré dans le cas non-supervisé (Cf. Figure 3.12.a). Nous constatons également une légère augmentation de l'encours global moyen par rapport au cas non-supervisé (Cf. Figure 3.12.b). Ce comportement s'explique par le fait que les indicateurs du retard et de l'encours sont antagonistes et le superviseur cherche à réaliser un compromis satisfaisant. En effet, afin de réduire le retard (surplus négatif), le superviseur tend à allouer le maximum de la capacité restante pour augmenter la productivité du système ce qui induit des encours plus importants.

D'une manière générale, l'ajout du superviseur flou a contribué à l'amélioration des performances du système. Cependant, une remarque s'impose sur la synthèse du superviseur, en particulier sur la détermination de la base de règles. En effet, si le nombre d'indicateurs globaux utilisés est élevé, l'aspect combinatoire devient important au niveau du nombre de règles utilisées. De plus, un compromis entre les différentes performances devient difficile, voire impossible à trouver. En effet, ces dernières se traitent au cas par cas et une généralisation reste difficilement réalisable. Pour remédier à ces problèmes, il serait intéressant d'envisager d'autres stratégies dans la conception du superviseur. Par exemple, les méthodologies d'agrégation via des opérateurs mathématiques constituent des alternatives possibles pour palier à ces difficultés.

4.2. Superviseur à base d'opérateurs d'agrégation

La conception d'un superviseur à base d'opérateurs d'agrégation consiste à formaliser la fonction de supervision S par un opérateur mathématique d'agrégation ψ qui, à partir d'un ensemble d'informations a_1, \dots, a_L (indicateurs de performances, actions, etc.), est capable de prendre une décision. Cette décision est considérée comme la meilleure au sens d'un compromis et apte à améliorer le fonctionnement du système en cas de dégradation des performances.

Considérons un système de production composé de N modules élémentaires. Soit un ensemble d'indicateurs de performance P_l , $l = 1, \dots, L$ auquel est associé un ensemble d'objectifs P_l^{obj} spécifié par l'utilisateur et définissant les intervalles de tolérance pour ces indicateurs (leurs zones de fonctionnement normales). L'originalité de la méthodologie proposée réside dans les réponses données aux questions suivantes :

- En s'appuyant sur le formalisme d'opérateurs d'agrégation, comment définir une stratégie décisionnelle capable de maintenir les indicateurs de performance à l'intérieur de leurs intervalles de tolérance ?
- Quels sont les mécanismes et les opérateurs d'agrégation les mieux adaptés ?
- Quelle est la robustesse de cette méthodologie de supervision en présence des aléas de fonctionnement et des incertitudes (pannes et changement de demande par exemple) ?

Dans ce cadre, la conception du superviseur peut être vue à travers deux mécanismes d'agrégation. Le premier est basé sur l'agrégation des actions. En effet, si pour chaque indicateur de performance on associe une action du superviseur, alors la composante additive de la supervision est le résultat de l'agrégation de ces différentes actions. Le deuxième mécanisme repose sur l'agrégation des mesures des indicateurs et leurs objectifs pour déterminer l'action de supervision associée à la performance agrégée obtenue.

Bien que les deux approches soient équivalentes sous certaines conditions, des différences en termes d'exploitation existent. En effet, contrairement à l'approche d'agrégation des actions dans laquelle les objectifs sont généralement spécifiés avec les mêmes degrés d'importance, l'agrégation des indicateurs (mesures et objectifs) s'apparente à des applications où des préférences et/ou des confiances sont clairement énoncées et associées aux objectifs.

Ces deux mécanismes sont résumés sur la Figure 3.13 et détaillés dans les paragraphes suivants.

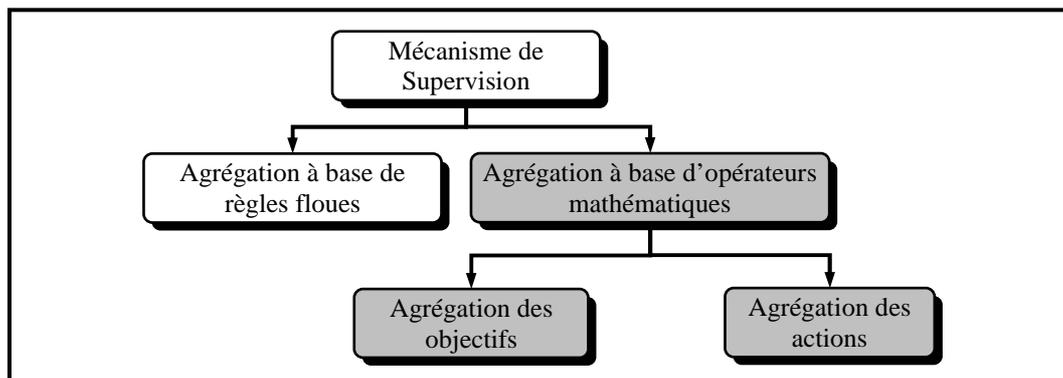


Figure 3.13 : Différentes approches de supervision développées.

Dans la littérature, plusieurs opérateurs d'agrégation ont été proposés et étudiés [Dubois and Prade, 2004]. Ces opérateurs ont été largement exploités dans des applications comme les sondages et le dépouillement des enquêtes, la gestion et l'évaluation des candidats, etc. Dans ce travail, nous transposons l'intérêt et l'applicabilité de ces opérateurs d'agrégation dans le domaine de la supervision des systèmes de production.

Nous donnons ici un survol rapide sur les opérateurs les plus usuels. Ces derniers sont classés en 4 catégories (Cf. Figure 3.14).

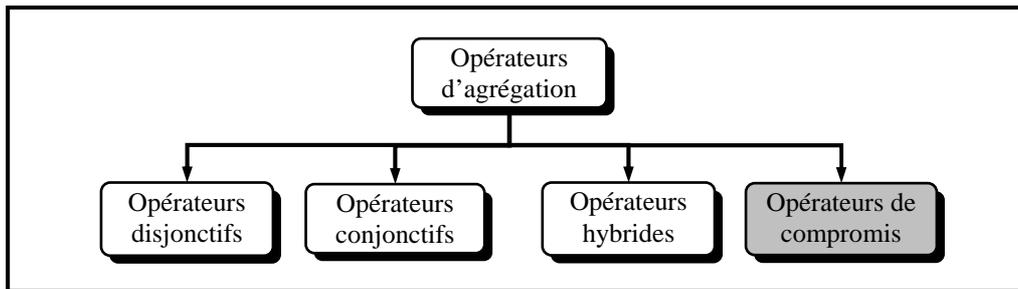


Figure 3.14 : Classification des opérateurs d'agrégation.

A. Les opérateurs conjonctifs

Un opérateur conjonctif implante une agrégation des informations ou des quantités comme un opérateur « ET » logique. Dans ce cas, le résultat de l'agrégation est élevé si toutes les informations à agréger sont élevées. A titre d'exemple, le *min* peut être choisi comme opérateur de conjonction. D'une manière générale, toute *T*-norme peut servir d'opérateur d'agrégation conjonctif.

B. Les opérateurs disjonctifs

Contrairement à un opérateur conjonctif, un opérateur disjonctif effectue une agrégation de type « OU » logique. Dans ce cas, le résultat de l'agrégation est élevé si au moins l'une des informations est élevée. A titre d'exemple, le *max* peut être choisi comme opérateur de disjonction. D'une manière générale, toute *T*-conorme peut jouer le rôle d'un opérateur d'agrégation disjonctif.

C. Les opérateurs de compromis

Les opérateurs de compromis se situent entre le mode conjonctif et disjonctif. Les principaux opérateurs sont :

- **La somme pondérée ou les opérateurs de moyenne**

La somme pondérée des informations a_1, \dots, a_L est donnée par l'équation :

$$\psi(a_1, \dots, a_L) = \sum_{l=1}^L w_l \cdot a_l \quad (3.11)$$

où les poids w_l doivent vérifier les propriétés suivantes :

$$\sum_{l=1}^L w_l = 1 \text{ et } w_l \in [0, 1], \text{ pour } l = 1, \dots, L. \quad (3.12)$$

- **La somme pondérée ordonnée (OWA)**

L'opérateur *OWA* (*Ordered Weighted Average*) est une somme pondérée où une relation d'ordre est utilisée [Yager, 1988 ; Yager and Kacprzyk, 1997]. En effet, les poids ne sont plus associés aux informations mais à leur rang. Dans ce cas, l'expression de la somme pondérée (3.11) devient comme suit :

$$\psi(a_1, \dots, a_L) = OWA(a_1, \dots, a_L) = \sum_{l=1}^L w_l \cdot a_{(l)} \quad (3.13)$$

avec w_l sont les poids vérifiant les propriétés (3.12) et la notation (l) indique une permutation des indices pour respecter la relation d'ordre :

$$a_{(1)} \leq a_{(2)} \leq \dots \leq a_{(L)} \quad (3.14)$$

- **Les intégrales floues**

Les définitions d'une intégrale floue sont liées à la définition d'une mesure floue [Grabisch, 1995]. La difficulté majeure pour une utilisation pratique est la définition de la mesure floue associée pour laquelle on est souvent obligé de faire appel à des méthodes numériques assez lourdes. Dans le contexte des intégrales floues, on peut citer les intégrales de Choquet et de Sugeno [Grabisch et al., 2000 ; Meyer and Roubens, 2006].

En effet, en présence des informations en interaction (synergie positive ou négative), l'intégrale de Choquet peut être utilisée comme opérateur d'agrégation. Un cas particulier est l'intégrale de Choquet 2-additive qui ne considère que des interactions mutuelles deux à deux, les interactions d'ordre supérieur étant considérées nulles [Grabisch and Roubens, 2000 ; Grabisch et Perny, 2003]. Dans ce travail, on se limite à cette dernière version.

Pour des informations a_1, \dots, a_L l'expression de l'intégrale de Choquet 2-additive est donnée par :

$$\begin{aligned} \psi(a_1, \dots, a_L) = CI(a_1, \dots, a_L) = & \sum_{I_{lk} > 0} \min(a_l, a_k) \cdot I_{lk} + \sum_{I_{lk} < 0} \max(a_l, a_k) \cdot |I_{lk}| + \\ & \sum_{l=1}^L a_l \cdot \left(\phi_l - \frac{1}{2} \sum_{k \neq l} |I_{lk}| \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

avec la propriété $\phi_l - \frac{1}{2} \sum_{k \neq l} |I_{lk}| \geq 0$ et :

- $I_{lk} \in [-1, 1]$: est le coefficient des interactions entre les a_l et a_k , *i.e.*, l'interaction mutuelle entre les performances l et k , telle que :
 - Une valeur de $I_{lk} > 0$ signifie une synergie positive entre a_l et a_k (complémentarité).
 - Une valeur de $I_{lk} < 0$ signifie une synergie négative entre a_l et a_k (redondance).
 - Une valeur de $I_{lk} = 0$ signifie aucune interaction entre a_l et a_k .
- ϕ_l : est l'indice de Shapley, *i.e.*, le poids d'importance relative à l'information a_l et dépend de toutes les coalitions où a_l intervient. Le coefficient de Shapley ϕ_l est équivalent au poids w_l de la somme pondérée dans (3.11) et doit vérifier les propriétés (3.12).

Dans le cas particulier où tous les I_{lk} sont nuls on retrouve l'opérateur de la somme pondérée. En effet, si les paramètres ϕ_l identifient les poids des informations considérées isolément, conformément à l'esprit de la somme pondérée, les paramètres I_{lk} viennent modifier cette somme pondérée en prenant en compte les non linéarités dues aux interactions mutuelles.

L'identification des paramètres ϕ_l et I_{lk} d'une intégrale de Choquet 2-additive peut se faire en première approximation par une interrogation directe des décideurs et un ajustement a posteriori. Pour une quantification plus fine, il est possible d'utiliser des méthodes telles que

MACBETH [Bana e Costa and Changas, 2004] qui permet de faire un recueil structuré et cohérent des préférences et de déduire les paramètres de l'intégrale de Choquet.

D. Les opérateurs hybrides

En dehors des trois catégories d'opérateurs citées précédemment, il existe un certain nombre d'opérateurs d'agrégation qui mélangent des T -normes (opérateurs conjonctifs) et des T -conormes (opérateurs disjonctifs) pour former des opérateurs hybrides. Dans ce contexte, on peut citer l'opérateur de Zimmermann et Zysno [Zimmermann and Zysno, 1980].

Dans cette thèse, une attention particulière est donnée aux opérateurs de compromis. En effet, de par la nature des informations dans le système de production et les objectifs désirés qui peuvent être en interaction, en conflit ou complémentaire, il nous paraît judicieux de s'orienter vers des opérateurs d'agrégation capables d'atteindre un compromis entre les objectifs dans la décision élaborée.

4.2.1. Mécanisme de supervision par agrégation des actions

Dans ce paragraphe, l'élaboration de l'action du superviseur est conçue par agrégation d'un certain nombre d'actions indexées sur les zones de fonctionnement du système. Dans ce cadre, deux mécanismes de supervision seront développés : le premier est basé sur une représentation par intervalles conventionnels et le second exploite une représentation par intervalles flous.

Ainsi, en considérant un ensemble de L indicateurs de performance P_1, \dots, P_L et la commande locale $r_{c_i}(t)$, le mécanisme de supervision consiste en deux étapes [Tamani et al., 2007b, 2008a] :

- L'étape d'élaboration de l'action de la supervision $r_{s_i}^l(t)$ en fonction de la performance de P_l . Selon la représentation exploitée (par intervalles conventionnels ou flous) un sélectionneur de mode de fonctionnement est utilisé pour choisir l'action appropriée.
- L'étape d'agrégation des différentes actions $r_{s_i}^l(t)$ à l'aide d'un opérateur mathématique afin d'élaborer l'action de la supervision $r_{s_i}(t)$ (la composante additive).

4.2.1.1. Conception à base d'intervalles conventionnels

A. Sélectionneur du mode de fonctionnement

Considérons la représentation par intervalles conventionnels donnée dans le paragraphe §3.1 (Cf. Figure 3.3). Dans ce cas, pour un indicateur P_l , son intervalle de tolérance P_l^{obj} peut être représenté par sa moyenne (*Midpoint* : M) et son rayon (*Radius* : R) comme suit :

$$P_l^{\text{obj}} = [(P_l^{\text{obj}})^-, (P_l^{\text{obj}})^+] = [M(P_l^{\text{obj}}) - R(P_l^{\text{obj}}), M(P_l^{\text{obj}}) + R(P_l^{\text{obj}})] \quad (3.16)$$

où

$$M(P_l^{\text{obj}}) = ((P_l^{\text{obj}})^- + (P_l^{\text{obj}})^+)/2 \text{ et } R(P_l^{\text{obj}}) = ((P_l^{\text{obj}})^+ - (P_l^{\text{obj}})^-)/2 \quad (3.17)$$

En fonction des valeurs mesurées par l'indicateur P_l , deux zones de fonctionnement (normal et dégradé) peuvent être distinguées (Cf. Figure 3.15).

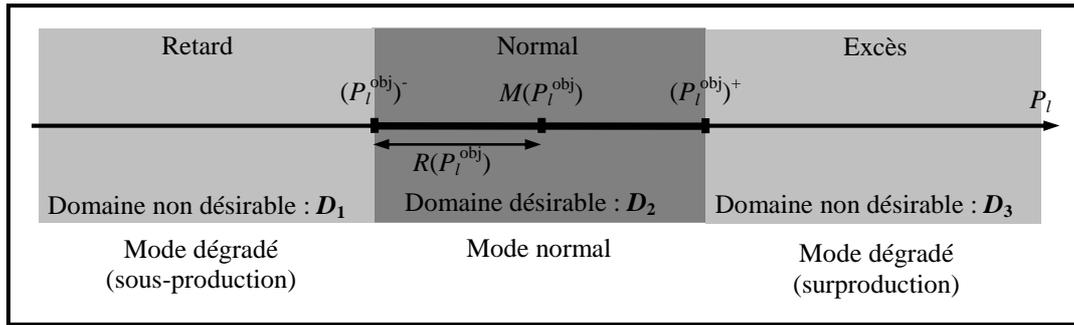


Figure 3.15 : Les différents modes (domaines) de fonctionnement du système.

- **Zone de tolérance ou de fonctionnement normal (Domaine désirable)**

Cette zone de fonctionnement, notée D_2 , est caractérisée par toutes les valeurs de l'indicateur P_l appartenant à son intervalle de tolérance. Dans ce cas, il est possible d'écrire :

$$\forall P_l \in P_l^{\text{obj}} \Leftrightarrow \begin{cases} P_l \geq (P_l^{\text{obj}})^- \\ P_l \leq (P_l^{\text{obj}})^+ \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P_l \geq M(P_l^{\text{obj}}) - R(P_l^{\text{obj}}) \\ P_l \leq M(P_l^{\text{obj}}) + R(P_l^{\text{obj}}) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P_l - M(P_l^{\text{obj}}) \geq -R(P_l^{\text{obj}}) \\ P_l - M(P_l^{\text{obj}}) \leq R(P_l^{\text{obj}}) \end{cases} \quad (3.18)$$

A partir de la relation (3.18), nous obtenons :

$$\forall P_l \in P_l^{\text{obj}} \Leftrightarrow |M(P_l^{\text{obj}}) - P_l| \leq R(P_l^{\text{obj}}) \quad (3.19)$$

On définit alors la relation binaire $\in(P_l, P_l^{\text{obj}})$ comme suit :

$$\in(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \begin{cases} 1 & , \text{si } |M(P_l^{\text{obj}}) - P_l| \leq R(P_l^{\text{obj}}) \\ 0 & , \text{sinon} \end{cases} \quad (3.20)$$

Si l'équation (3.20) est vérifiée cela signifie que la performance de P_l associée à l'expression de l'objectif P_l^{obj} est satisfaisante. Dans ce cas, le superviseur ne modifie pas la commande locale $r_{c_i}(t)$. Autrement dit :

$$\text{Si } \in(P_l, P_l^{\text{obj}}), \text{ alors } r_{c_i}^l(t) = 0 \quad (3.21)$$

- **Zone de fonctionnement en mode dégradé (Domaine indésirable)**

Ce domaine non désirable se caractérise par la violation de la condition (3.20). Dans ce cas, le système est dit dans un mode de fonctionnement dégradé ou encore perturbé. Cet état conduit le superviseur à déclencher une action corrective en fonction de la performance retournée afin de ramener le système dans la zone de fonctionnement souhaité.

Ce domaine peut être défini par la relation booléenne complémentaire de (3.20), notée $\notin(P_l, P_l^{\text{obj}})$ comme suit :

$$\notin(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \begin{cases} 1 & , \text{si } |M(P_l^{\text{obj}}) - P_l| > R(P_l^{\text{obj}}) \\ 0 & , \text{sinon} \end{cases} \quad (3.22)$$

Ainsi, comme illustré sur la Figure 3.15, la zone de fonctionnement dégradé se scinde en deux parties. Selon que la mesure de l'indicateur P_l soit dans le domaine D_1 (retard sur l'objectif) ou D_3 (excès par rapport à l'objectif), le superviseur décide soit d'allouer de la capacité restante soit de réduire la production.

Autrement dit :

$$\text{Si } P_l \in D_3 \Leftrightarrow P_l > (P_l^{\text{obj}})^+ \Leftrightarrow P_l > M(P_l^{\text{obj}}) + R(P_l^{\text{obj}}), \text{ alors : } r_{s_i}^l(t) = -r_{c_i}(t) \quad (3.23)$$

Dans ce cas, l'action du superviseur consiste à stopper la production du module $MP(i)$.

De la même manière, on peut écrire :

$$\text{Si } P_l \in D_1 \Leftrightarrow P_l < (P_l^{\text{obj}})^- \Leftrightarrow P_l < M(P_l^{\text{obj}}) - R(P_l^{\text{obj}}), \text{ alors : } r_{s_i}^l(t) = 1 - r_{c_i}(t) \quad (3.24)$$

Dans ce cas, l'action du superviseur consiste à allouer toute la capacité restante au module $MP(i)$.

Ainsi, en fonction de la commande locale $r_{c_i}(t)$, l'action du superviseur associée à la performance de P_l peut s'exprimer de la façon suivante :

$$r_{s_i}^l(t) = \begin{cases} \frac{1 - \text{sgn}(P_l - M(P_l^{\text{obj}}))}{2} - r_{c_i}(t) & , \text{ si } \notin (P_l, P_l^{\text{obj}}) \\ 0 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (3.25)$$

avec « sgn » la fonction signe définie comme suit :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ si } x \geq 0 \\ -1 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (3.26)$$

Si on pose :

$$\Delta(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \frac{1 - \text{sgn}(P_l - M(P_l^{\text{obj}}))}{2} \quad (3.27)$$

L'équation (3.25) peut être réécrite sous une forme compacte comme suit :

$$r_{s_i}^l(t) = \notin (P_l, P_l^{\text{obj}}) \cdot (\Delta(P_l, P_l^{\text{obj}}) - r_{c_i}(t)) \quad (3.28)$$

Pour un indicateur P_l , les commutations entre les trois actions du superviseur en fonction des différentes zones de fonctionnement sont illustrées sur la Figure 3.16. Les commutations entre zones de fonctionnement s'effectuent selon un mécanisme prédéfini dépendant des bornes des intervalles de tolérance des objectifs. Dans ce contexte, pour chaque indicateur de performance P_l , la commutation franche de $r_{s_i}^l(t)$ aura lieu uniquement aux bornes de son intervalle de tolérance P_l^{obj} .

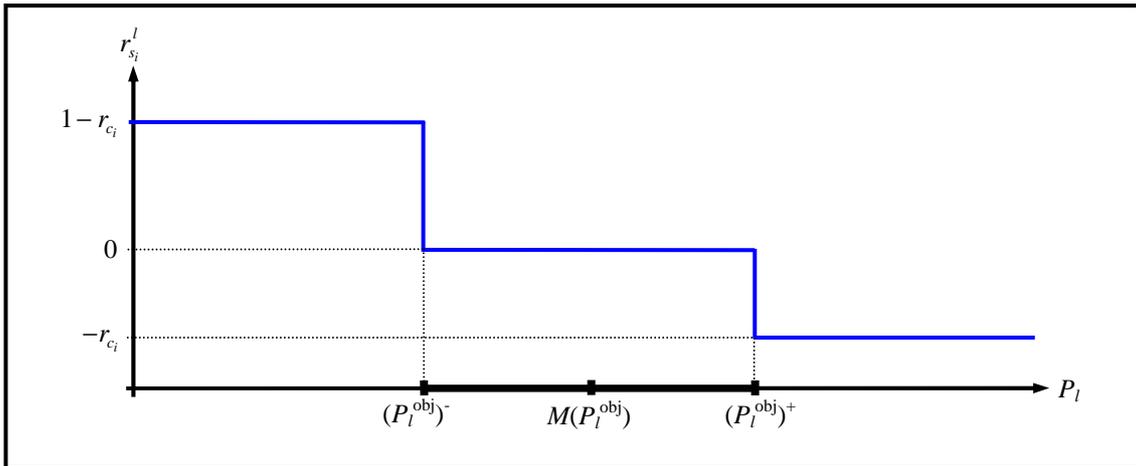


Figure 3.16 : Les commutations de l'action du superviseur pour l'indicateur de performance P_l .

Pour un ensemble de L indicateurs de performance, le schéma de la Figure 3.17 illustre l'étape de sélection des différentes actions possibles du superviseur.

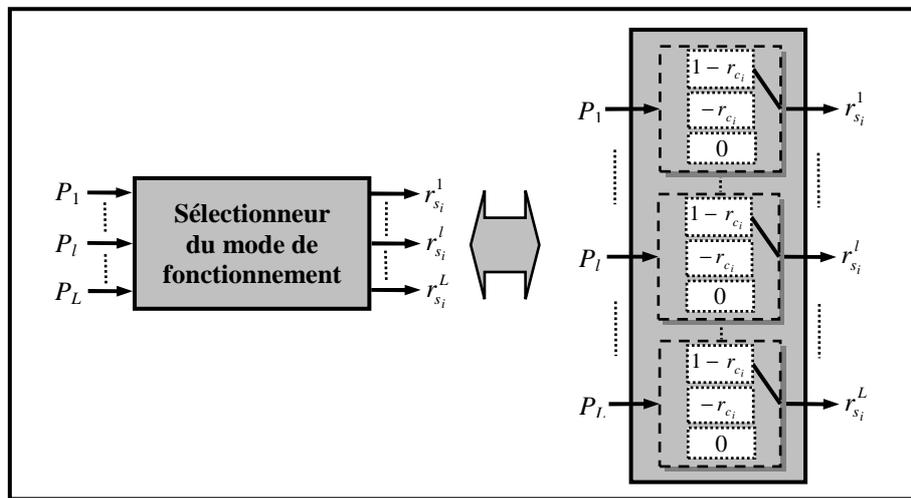


Figure 3.17 : Sélectionneur du mode de fonctionnement.

B. Principe d'agrégation des actions

En considérant le module $MP(i)$, l'ensemble des actions de supervision $r_{s_i}^1(t), \dots, r_{s_i}^L(t)$ résultant de l'évaluation des performances des indicateurs P_1, \dots, P_L doivent être agrégées afin de définir la composante additive $r_{s_i}(t)$.

Pour réaliser cette composante de la supervision, nous utilisons l'opérateur le plus simple, à savoir la somme pondérée. D'autres types d'opérateurs d'agrégation peuvent être également utilisés. Ainsi, à travers la somme pondérée, l'expression de l'action agrégée $r_{s_i}(t)$ est donnée par :

$$r_{s_i}(t) = \psi(r_{s_i}^1(t), \dots, r_{s_i}^L(t)) = \sum_{l=1}^L w_l(t) \cdot r_{s_i}^l(t) \tag{3.29}$$

où $w_l(t)$ représente le poids traduisant à chaque instant l'importance de l'action $r_{s_i}^l(t)$ associée à la performance P_l .

Etant donné que les actions de supervision n'agissent qu'en cas de dérive du système (fonctionnement en mode dégradé), leurs pondérations doivent être le reflet du degré de non satisfaction des objectifs globaux.

Dans ce sens, il est intéressant d'introduire la notion de l'éloignement de la mesure par rapport à l'objectif. Autrement dit, exprimer le degré d'éloignement de la mesure de l'indicateur P_l par rapport aux bornes de son intervalle de tolérance P_l^{obj} . Cette distance est alors exploitée pour calculer les poids dans l'expression de l'action (3.29).

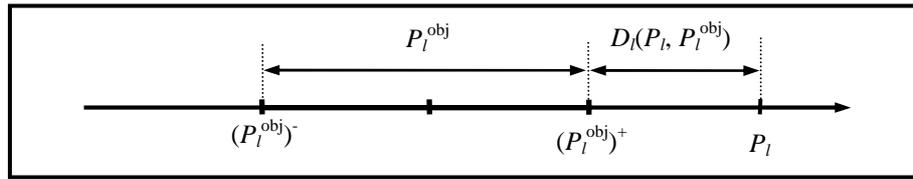


Figure 3.18 : L'éloignement de la performance P_l de l'intervalle de tolérance.

Ainsi, si on note par $D_l(P_l, P_l^{\text{obj}})$ la distance entre la mesure de l'indicateur P_l et les bornes de son intervalle de tolérance P_l^{obj} (Cf. Figure 3.18) elle peut être évaluée par la relation suivante :

$$D_l(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \begin{cases} |P_l - (P_l^{\text{obj}})^-| & , \text{ si } P_l < (P_l^{\text{obj}})^- \\ |P_l - (P_l^{\text{obj}})^+| & , \text{ si } P_l > (P_l^{\text{obj}})^+ \\ 0 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (3.30)$$

En accord avec les équations (3.16), (3.22) et (3.26), l'équation (3.30) peut se réécrire sous une forme compacte de la façon suivante :

$$D_l(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \left| P_l - \left(M(P_l^{\text{obj}}) + \text{sgn}(P_l - M(P_l^{\text{obj}})) \cdot R(P_l^{\text{obj}}) \right) \right| \notin (P_l, P_l^{\text{obj}}) \quad (3.31)$$

Pour des raisons de cohérence dans l'expression de cette distance, cette dernière est normalisée par rapport à la largeur de l'intervalle de tolérance P_l^{obj} . Soit :

$$D_l^n(P_l, P_l^{\text{obj}}) = \frac{D_l(P_l, P_l^{\text{obj}})}{(P_l^{\text{obj}})^+ - (P_l^{\text{obj}})^-} = \frac{D_l(P_l, P_l^{\text{obj}})}{2 \cdot R(P_l^{\text{obj}})} \quad (3.32)$$

Dans ce cas, les poids $w_l(t)$ sont calculés de la façon suivante :

$$w_l(t) = \frac{D_l^n(P_l, P_l^{\text{obj}})}{\sum_{l=1}^L D_l^n(P_l, P_l^{\text{obj}})} \quad (3.33)$$

Il est clair ici que le poids le plus fort est associé à l'action dont la performance est la moins satisfaisante. En effet, plus le degré d'éloignement de la mesure par rapport à l'objectif est

grand, moins est la performance réalisée est satisfaisante et donc plus le poids affecté à son action est important.

La Figure 3.19 illustre le synoptique du mécanisme de supervision à base d'intervalles conventionnels par agrégation des actions.

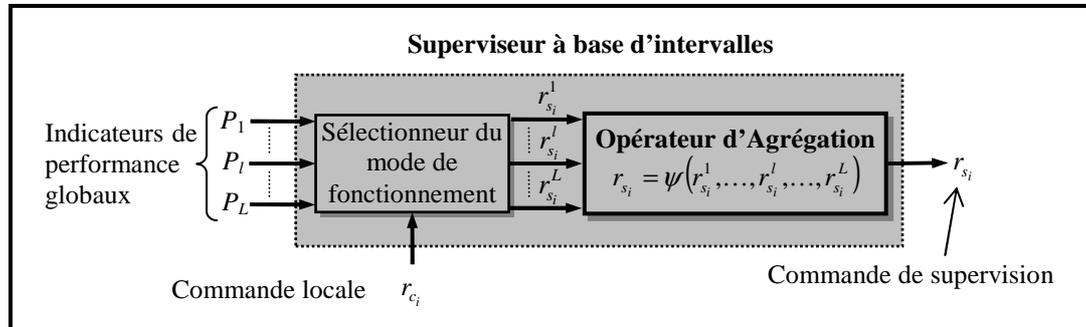


Figure 3.19 : Synoptique du mécanisme de supervision à base d'intervalles.

C. Exemple illustratif

Dans le but d'illustrer le principe d'agrégation et les performances du superviseur, nous proposons d'étudier dans un premier temps un cas avec deux indicateurs qui se complètent (non contradictoires). Par la suite un troisième indicateur antagoniste avec les deux premiers est ajouté au superviseur.

- **Cas à deux indicateurs de performance**

Nous reprenons l'exemple de la ligne de production à 4 modules de transformation traitée précédemment en conservant uniquement les deux premiers indicateurs, à savoir :

- P_1 : le surplus final moyen.
- P_2 : le surplus final instantané.

Il est clair que les performances exprimées par ces deux indicateurs évoluent dans le même sens. Les intervalles de tolérance des indicateurs sont choisis comme suit :

$$P_1^{\text{obj}} = [-1, +1] ; P_2^{\text{obj}} = [-1, +1]$$

Les simulations sont effectuées dans les conditions opératoires identiques à celles du cas de la supervision par système flou (Cf. §4.1.2). La Figure 3.20 et la Figure 3.21 montrent l'évolution des indicateurs P_1 et P_2 par rapport à leurs intervalles de tolérance dans les cas supervisé et non supervisé. L'évolution de l'encours instantané (indicateur P_3 utilisé dans l'exemple précédent et qui sera introduit dans le deuxième cas) est donnée sur la Figure 3.22.

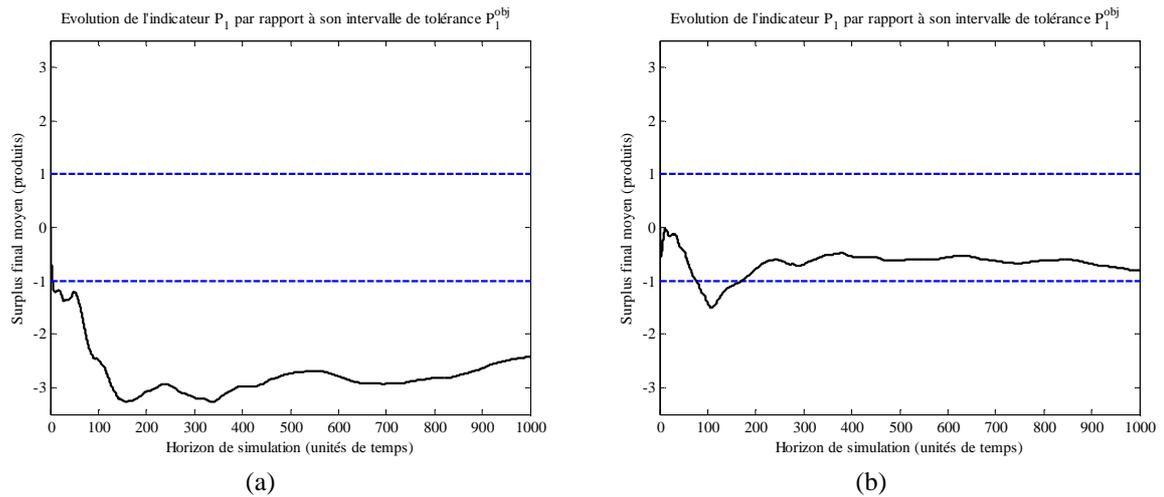


Figure 3.20 : Surplus final moyen P_1 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

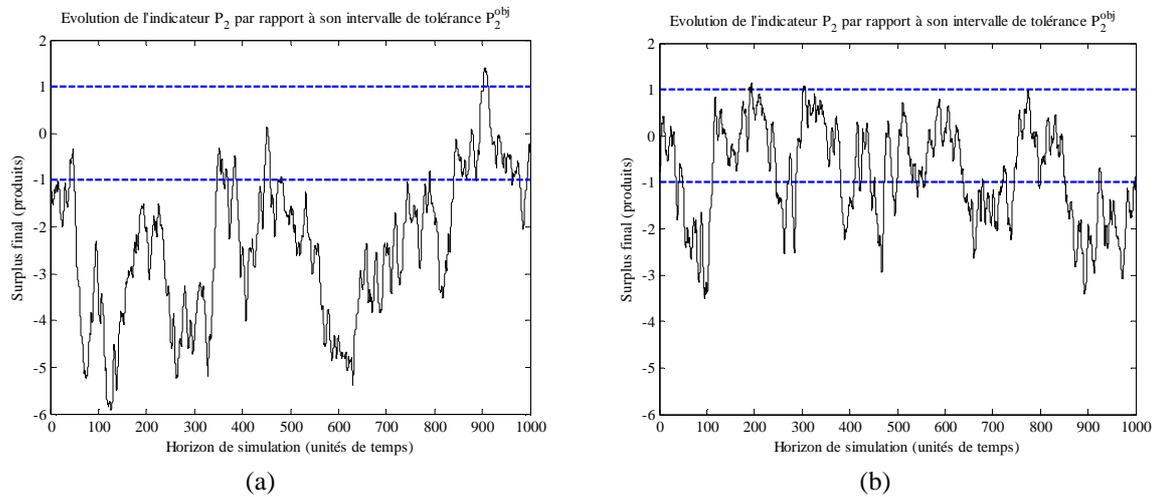


Figure 3.21 : Surplus final P_2 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

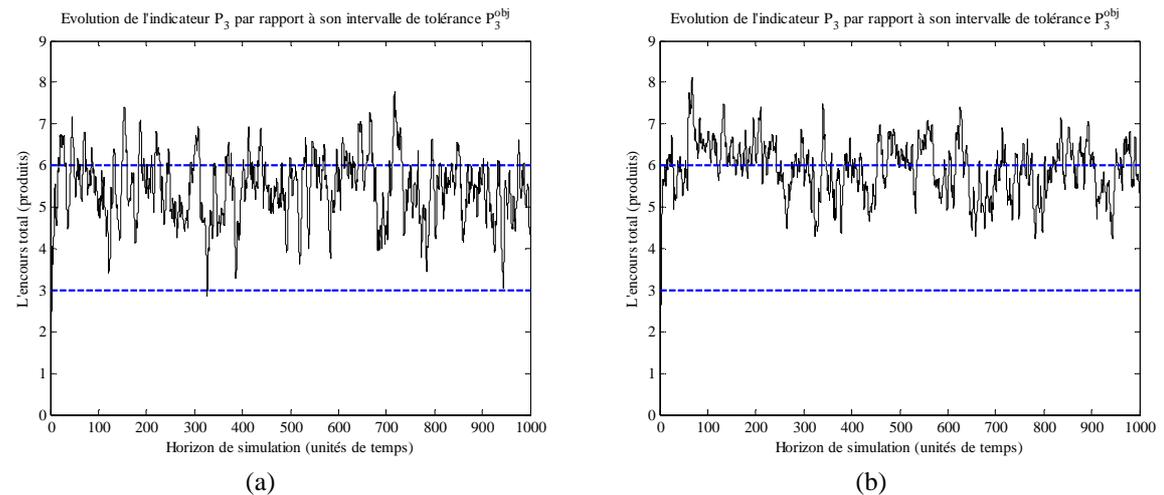


Figure 3.22 : L'encours P_3 : (a) cas non-supervisé, (b) cas supervisé.

La Figure 3.23.a et la Figure 3.23.b illustrent respectivement les tendances moyennes en termes de retard sur la production et d'encours.

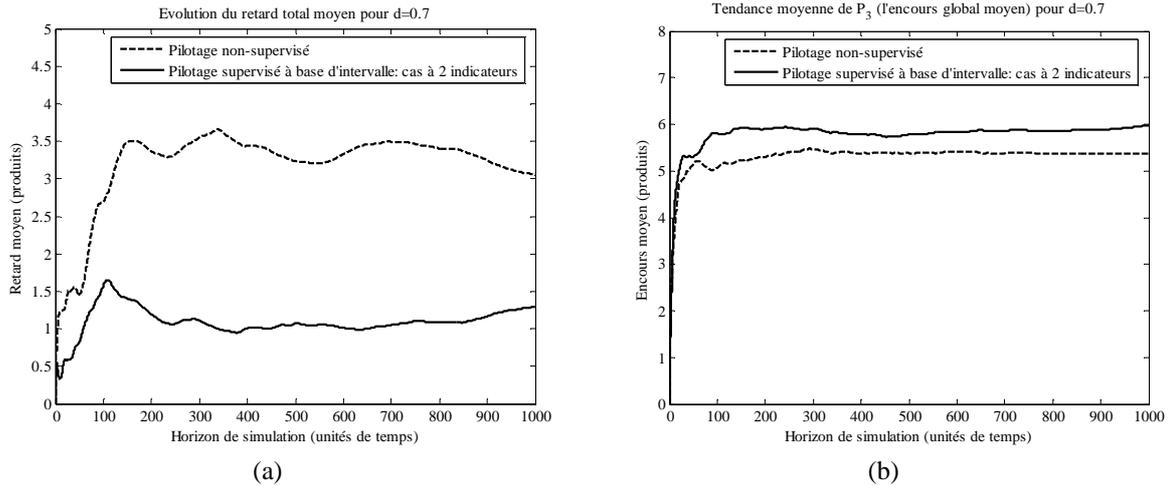


Figure 3.23 : Tendances moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.

A partir des résultats obtenus, les mêmes constatations établies dans la supervision à base d'agrégation par règles floues restent valides. En effet, nous observons en particulier une amélioration de l'indicateur du surplus final et donc la performance associée au retard (Cf. Figure 3.20, Figure 3.21 et Figure 3.23.a) au détriment de la performance de l'encours (Cf. Figure 3.22 et Figure 3.23.b). Cela est dû à l'aspect conflictuel de ces deux performances (retard et encours) comme nous l'avons souligné précédemment.

• Cas à trois indicateurs de performance

Afin d'observer le comportement du superviseur en présence d'objectifs antagonistes, nous proposons ici d'introduire l'indicateur de l'encours, noté P_3 . Son intervalle de tolérance est fixé à : $P_3^{obj} = [3, 6]$.

La Figure 3.24, la Figure 3.25 et la Figure 3.26 comparent, respectivement, l'évolution des indicateurs P_1 , P_2 et P_3 vis-à-vis de leurs intervalles de tolérance et aussi par rapport au précédent cas où uniquement deux indicateurs sont utilisés.

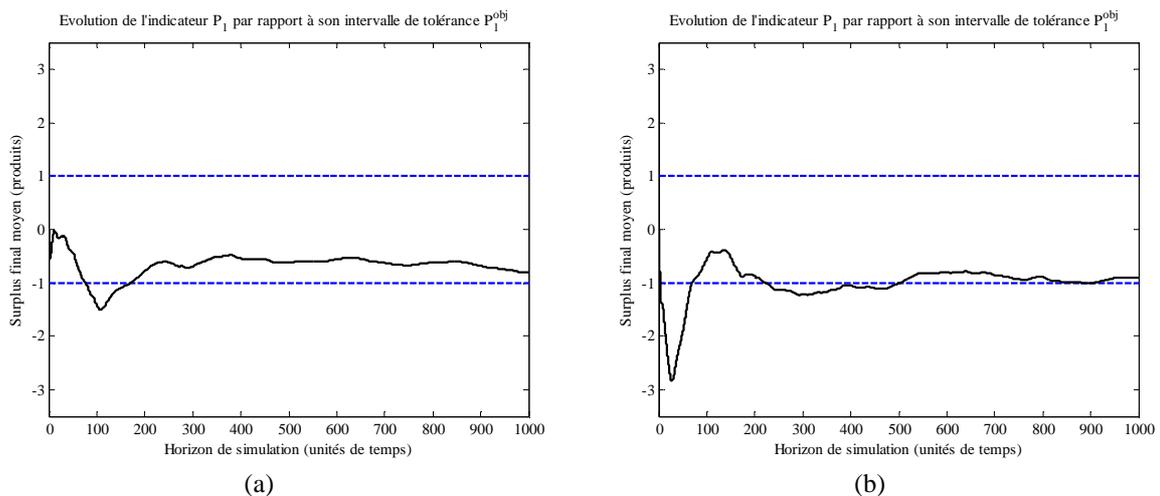


Figure 3.24 : Surplus final moyen P_1 : (a) cas à 2 indicateurs, (b) cas à 3 indicateurs.

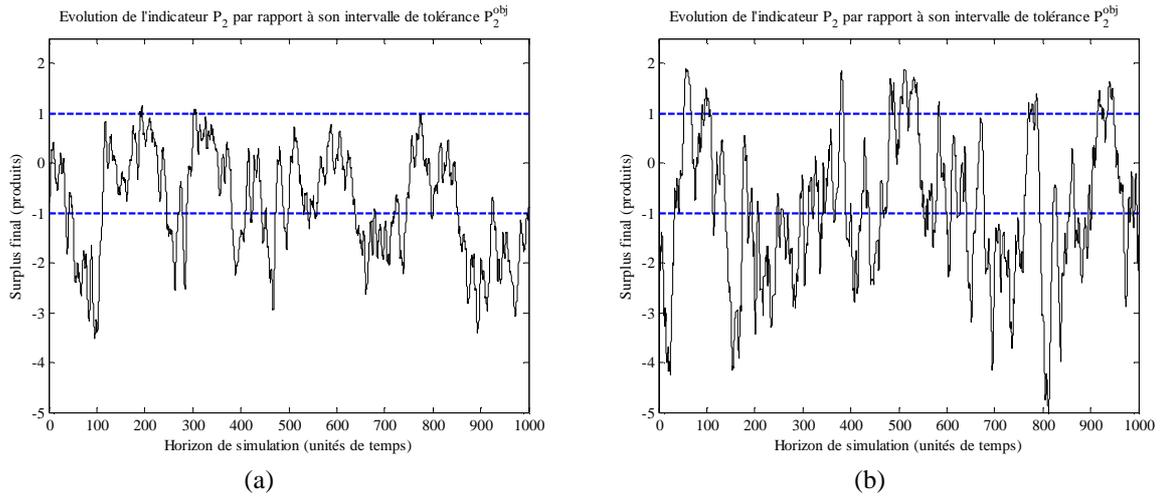


Figure 3.25 : Surplus final P_2 : (a) cas à 2 indicateurs, (b) cas à 3 indicateurs.

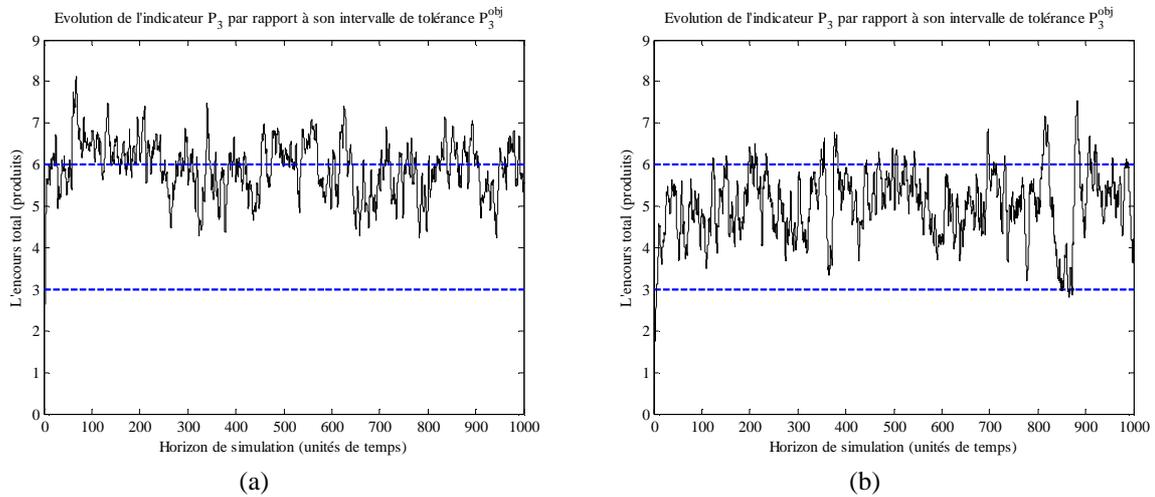


Figure 3.26 : L'encours P_3 : (a) cas à 2 indicateurs, (b) cas 3 indicateurs.

La Figure 3.27.a et la Figure 3.27.b comparent les tendances moyennes des indicateurs en termes de retard sur la production et d'encours dans les trois situations de pilotage (non-supervisé, supervisé avec 2 indicateurs et supervisé avec 3 indicateurs).

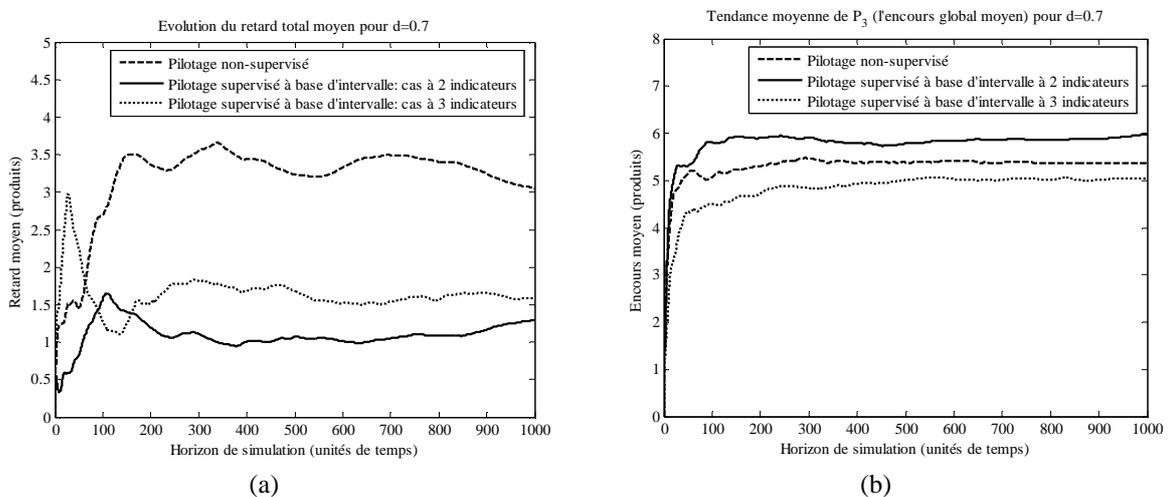


Figure 3.27 : Tendances moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.

En introduisant l'indicateur de l'encours, nous constatons une légère détérioration des performances du surplus. En effet, le superviseur cherche à maintenir la performance de l'encours en réduisant le volume des flux dans le système (Cf. Figure 3.27.b). Comme cette performance évolue dans le sens opposé à celle du retard, son amélioration détériore légèrement la performance du surplus final ce qui induit une légère augmentation du niveau du retard (Cf. Figure 3.27.a). Toutefois, par rapport au cas non-supervisé, les différentes performances enregistrées sont nettement améliorées. En conclusion, on peut dire que l'action du superviseur est élaborée dans le sens de la réalisation d'un compromis entre les performances désirées.

Si la méthodologie de supervision proposée s'affranchit de la complexité de synthèse liée au nombre de règles et leur obtention évoquée dans le cas du superviseur flou, il n'en demeure pas moins que quelques performances restent perfectibles. En effet, les commutations franches (Cf. Figure 3.16) dans le cas du superviseur par intervalles conventionnels induisent de fortes fluctuations qui peuvent rendre les performances instables. A titre d'illustration, la Figure 3.28 donne l'évolution de la loi de supervision du dernier module contrôlé $MPC(4)$.

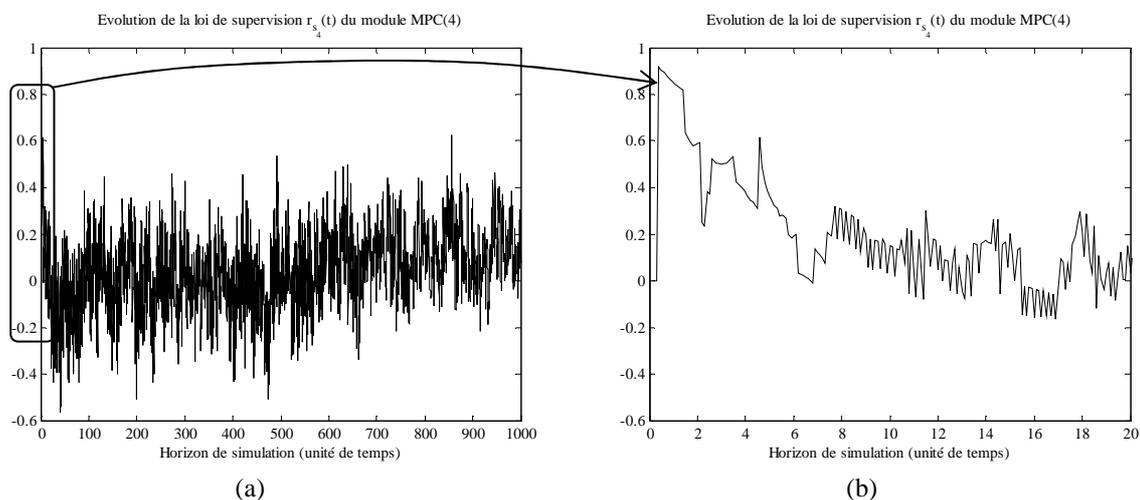


Figure 3.28 : Evolution de la loi de supervision du dernier module de la ligne de transformation.

Afin de remédier à ce problème, une pondération des actions du superviseur aux limites des intervalles de tolérance permettrait d'adoucir ces commutations franches. Cette solution peut être envisagée à l'aide d'une représentation des objectifs par des intervalles flous.

4.2.1.2. Conception à base d'intervalles flous

A. Représentation par intervalles flous

Un intervalle conventionnel peut être vu comme un cas particulier d'un intervalle flou dont la fonction d'appartenance notée μ_a est égale à 1 sur tout l'intervalle et 0 en dehors (Cf. Figure 3.29.a). En effet, la représentation par intervalles conventionnels suppose que toutes les valeurs possibles de l'intervalle sont définies avec le même degré d'appartenance [Lodwick and Jamison, 2003]. Autrement dit, cette représentation nous autorise à supposer que toute valeur dans l'intervalle se situe d'une manière équivalente. Afin d'enrichir cette représentation, nous proposons de définir les domaines de tolérance par des intervalles flous. Dans ce cas, une distribution de possibilité donnée par une fonction d'appartenance notée μ_A est associée à l'intervalle flou A (Cf. Figure 3.29.b).

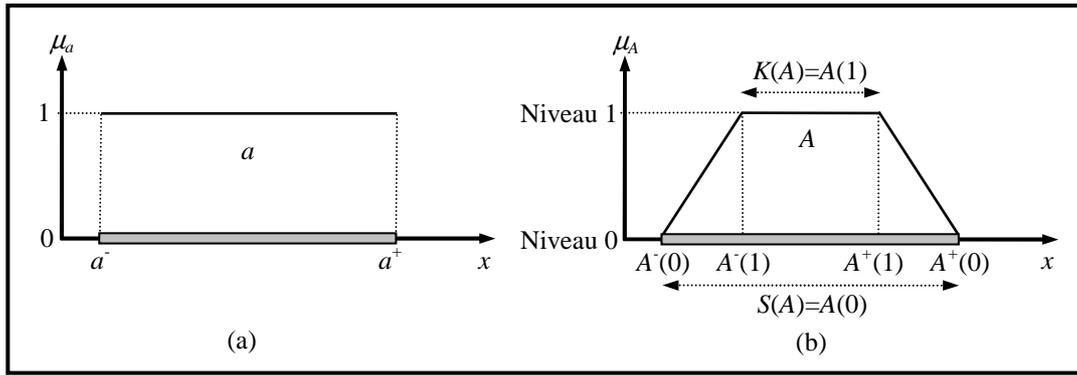


Figure 3.29 : Représentation par : (a) intervalle, (b) intervalle flou.

Ainsi, si nous attribuons à chaque intervalle flou un degré d'appartenance (degré de satisfaction), ce dernier peut être vu comme une famille d'intervalles conventionnels. Ce qui implique que la représentation floue généralise le concept de la représentation par intervalles conventionnels.

Dans un intervalle flou A , en plus de la dimension horizontale, qui revient à la représentation par intervalles conventionnels, la dimension verticale est relative au degré d'appartenance qui est restreint aux valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Dans ce cas, deux types d'informations définissent complètement un intervalle flou. Ces informations sont le support $S(A)$ et le noyau $K(A)$. Ces derniers, définis sur la dimension horizontale, sont associés à deux niveaux différents sur la dimension verticale (niveau 0 pour le support et niveau 1 pour le noyau, Cf. Figure 3.29.b). Pour le support nous proposons de prendre l'intervalle de toutes les valeurs possibles et pour le noyau nous considérons l'ensemble des meilleures valeurs (valeurs désirées).

Pour des raisons de simplicité et de facilité d'interprétation, uniquement les intervalles flous trapézoïdaux et triangulaires sont exploités dans cette étude. Par exemple, pour un intervalle flou trapézoïdal A , nous avons :

$$S(A) = A(0) = [A^-(0), A^+(0)] \text{ et } K(A) = A(1) = [A^-(1), A^+(1)] \quad (3.34)$$

avec :

$$\begin{cases} A^-(0) = M(A(0)) - R(A(0)) \\ A^+(0) = M(A(0)) + R(A(0)) \end{cases} \text{ et } \begin{cases} A^-(1) = M(A(1)) - R(A(1)) \\ A^+(1) = M(A(1)) + R(A(1)) \end{cases} \quad (3.35)$$

Pour définir complètement un intervalle flou, nous introduisons les fonctions des profils gauche et droit [Dubois et al., 2004, 2005 ; Boukezzoula et al., 2006, 2007a, 2007b]. Comme illustré sur la Figure 3.30, ces dernières sont respectivement notées A^- (partie croissante) et A^+ (partie décroissante) et donnés par :

$$\begin{cases} A^-(\alpha) = \inf \left\{ x \mid \mu_A(x) \geq \alpha; x \geq A^-(0) \right\} = (1 - \alpha) \cdot A^-(0) + \alpha \cdot A^-(1) \\ A^+(\alpha) = \sup \left\{ x \mid \mu_A(x) \geq \alpha; x \leq A^+(0) \right\} = (1 - \alpha) \cdot A^+(0) + \alpha \cdot A^+(1) \end{cases} \quad (3.36)$$

Nous définissons également la notion de coupe de niveau α donnée par :

$$A_\alpha = \{x \in A \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} = [A^-(\alpha), A^+(\alpha)], \alpha \in [0, 1] \quad (3.37)$$

La coupe de niveau α représente l'ensemble des éléments de A qui appartiennent à A avec un degré de satisfaction au moins égal à α (Cf. Figure 3.30).

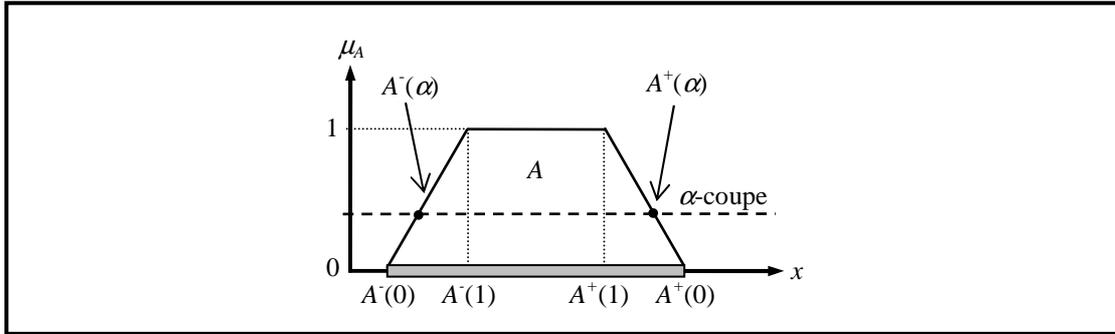


Figure 3.30 : Niveau de coupe et représentation des fonctions profils d'un intervalle flou trapézoïdale.

Finalement, de la même manière que dans le cas d'un intervalle conventionnel a qui est représenté par ses bornes supérieure et inférieure, *i.e.*, $a = [a^-, a^+]$, un intervalle flou A est représenté par ses profils gauche et droit, *i.e.*, $A = [A^-(\alpha), A^+(\alpha)]$. Il est important d'insister sur les deux points suivants :

1. La représentation par profils définit complètement un intervalle flou trapézoïdal A si et seulement si les conditions suivantes sont satisfaites :
 - $A^-(\alpha)$ est croissant par rapport à $\alpha \in [0, 1]$,
 - $A^+(\alpha)$ est décroissant par rapport à $\alpha \in [0, 1]$,
 - $A^-(1) \leq A^+(1)$ et $A(1) \subset A(0)$.
2. Le noyau n'est pas exhibé dans l'expression de l'intervalle flou car ce dernier peut être directement déterminé à partir de l'expression des profils pour une coupe $\alpha = 1$.

B. Sélectionneur du mode de fonctionnement

Dans ce paragraphe, nous exploitons la représentation par intervalles flous des objectifs pour décrire les commutations entre les différents modes de fonctionnement du système. En effet, la représentation d'un objectif P_l^{obj} par un intervalle flou consiste à formaliser les différents modes de fonctionnement du système (les zones de fonctionnement) à travers son support et son noyau. Ainsi, pour un intervalle flou P_l^{obj} décrivant l'objectif associé à l'indicateur P_l , on a :

$$\begin{aligned} S(P_l^{\text{obj}}) &= P_l^{\text{obj}}(0) = [(P_l^{\text{obj}})^-(0), (P_l^{\text{obj}})^+(0)] : \text{support} \\ K(P_l^{\text{obj}}) &= P_l^{\text{obj}}(1) = [(P_l^{\text{obj}})^-(1), (P_l^{\text{obj}})^+(1)] : \text{noyau} \end{aligned} \quad (3.38)$$

En effet, en accord avec la représentation par intervalles conventionnels donnée sur la Figure 3.15, les trois domaines de fonctionnement sont représentés par un intervalle flou trapézoïdal comme illustré sur la Figure 3.31.

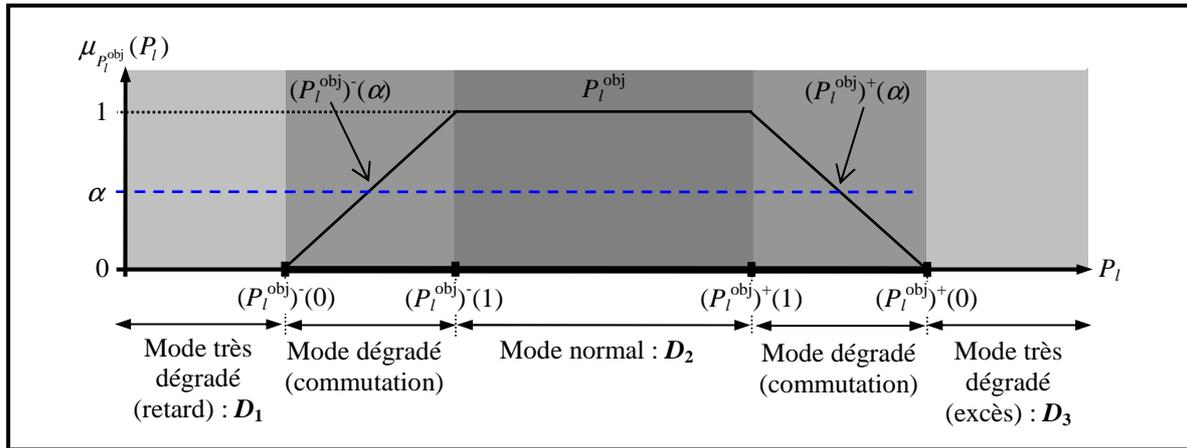


Figure 3.31 : Représentation par intervalle flou de l'objectif associé à l'indicateur P_l .

Dans ce cadre, les différents modes de fonctionnement sont décrits de façon similaire au cas de l'intervalle conventionnel. En effet :

- Si toutes les valeurs de l'indicateur P_l appartiennent au noyau $P_l^{\text{obj}}(1)$ correspondant à un mode de fonctionnement normal (domaine D_2 sur la Figure 3.31), alors la relation (3.20) est vérifiée. Cela signifie que la confiance attribuée à cet indicateur est totale (son niveau de coupe $\alpha = 1$) et la performance associée à l'expression de l'objectif P_l^{obj} est satisfaisante. Dans ce cas, le superviseur n'augmente pas la commande locale. L'équation (3.21) se réécrit alors comme suit :

$$\text{si } \in (P_l, P_l^{\text{obj}}(1)) \Rightarrow \alpha = 1, \text{ alors } r_{s_i}^l(t) = 0 \quad (3.39)$$

Cette valeur de $r_{s_i}^l(t) = 0$ peut être définie comme le noyau (valeur modale) d'un intervalle flou triangulaire représentant le domaine de validité de l'action du superviseur.

- Si une valeur de l'indicateur P_l est à l'extérieur du support $P_l^{\text{obj}}(0)$, le système est alors en mode de fonctionnement très dégradé (les domaines D_1 et D_3 sur la Figure 3.31). Dans ce cas, la confiance attribuée à cet indicateur est nulle (sa coupe de niveau $\alpha = 0$) et la performance associée à l'expression de l'objectif P_l^{obj} est totalement insuffisante. Ainsi, conformément au comportement décrit dans le cas de la représentation par intervalles conventionnels (Cf. §4.2.1.1), l'action du superviseur est élaborée comme suit :

$$\text{si } \notin (P_l, P_l^{\text{obj}}(0)) \Rightarrow \alpha = 0, \text{ alors } r_{s_i}^l(t) = \begin{cases} 1 - r_{c_i}(t) & , \text{ si } P_l < (P_l^{\text{obj}})^-(0) \\ -r_{c_i}(t) & , \text{ si } P_l > (P_l^{\text{obj}})^+(0) \end{cases} \quad (3.40)$$

Par utilisation de la relation (3.27), l'équation (3.40) s'écrit :

$$\text{si } \notin (P_l, P_l^{\text{obj}}(0)) \Rightarrow \alpha = 0, \text{ alors } r_{s_i}^l(t) = \Delta(P_l, P_l^{\text{obj}}(0)) - r_{c_i}(t) \quad (3.41)$$

Dans ce cas, l'intervalle $r_{s_i}^l(t) \in [-r_{c_i}(t), 1 - r_{c_i}(t)]$ peut être défini pour délimiter le support de l'intervalle flou triangulaire représentant le domaine de validité de la loi de supervision.

- Si une valeur de l'indicateur P_l est à l'intérieur du support $P_l^{\text{obj}}(0)$ mais en dehors de son noyau $P_l^{\text{obj}}(1)$, le système est alors dit en mode dégradé (ou de commutation). Dans ce cas, l'action du superviseur est déterminée en fonction du niveau de coupe α attribuée à la mesure obtenue de l'indicateur P_l . Ainsi, selon la zone dans laquelle évolue l'indicateur P_l , le niveau de coupe α est donné à partir de l'inverse des fonctions des profils gauche et droit. En effet :
 - Lorsque P_l évolue dans la zone entre D_1 et D_2 (Cf. Figure 3.31), le niveau de la α -coupe est donnée par l'inversion de la fonction du profil gauche. Autrement dit :

$$\text{si } \in \left(P_l, [(P_l^{\text{obj}})^-(0), (P_l^{\text{obj}})^-(1)] \right) \Rightarrow (P_l^{\text{obj}})^-(\alpha) = P_l, \text{ alors } \alpha = \left((P_l^{\text{obj}})^-(P_l) \right)^{-1} \quad (3.42)$$

Soit :

$$\alpha(P_l) = \frac{P_l - (P_l^{\text{obj}})^-(0)}{(P_l^{\text{obj}})^-(1) - (P_l^{\text{obj}})^-(0)} \quad (3.43)$$

- Lorsque P_l évolue dans la zone entre D_2 et D_3 (Cf. Figure 3.31), le niveau de la α -coupe est donnée par l'inverse de la fonction profil droit. Autrement dit :

$$\text{si } \in \left(P_l, [(P_l^{\text{obj}})^+(1), (P_l^{\text{obj}})^+(0)] \right) \Rightarrow (P_l^{\text{obj}})^+(\alpha) = P_l, \text{ alors } \alpha = \left((P_l^{\text{obj}})^+(P_l) \right)^{-1} \quad (3.44)$$

Soit :

$$\alpha(P_l) = \frac{P_l - (P_l^{\text{obj}})^+(1)}{(P_l^{\text{obj}})^+(0) - (P_l^{\text{obj}})^+(1)} \quad (3.45)$$

Ainsi, en fonction de la valeur de coupe α correspondant à P_l , obtenue par (3.43) ou (3.45), l'action du superviseur est définie de la façon suivante :

$$r_{s_i}^l(t) = \begin{cases} (1-\alpha)(1-r_{c_i}(t)) & , \text{ si } \in \left(P_l, [(P_l^{\text{obj}})^-(0), (P_l^{\text{obj}})^-(1)] \right) \\ (1-\alpha)(-r_{c_i}(t)) & , \text{ si } \in \left(P_l, [(P_l^{\text{obj}})^+(1), (P_l^{\text{obj}})^+(0)] \right) \end{cases} \quad (3.46)$$

D'où finalement, en agrégeant les relations (3.39), (3.41) et (3.46), et par analogie avec la relation (3.28), nous obtenons :

$$r_{s_i}^l(t) = \notin \left(P_l, P_l^{\text{obj}}(1) \right) \cdot \left(\Delta \left(P_l, P_l^{\text{obj}}(1) \right) - r_{c_i}(t) \right) \cdot (1-\alpha) \quad (3.47)$$

Les valeurs de $r_{s_i}^l(t)$ obtenues à partir de (3.39) et (3.41) définissent respectivement le support et le noyau d'un intervalle flou triangulaire noté $R_{s_i}^l$, tandis que la fonction (3.46) fournit les profils gauche et droit. Cet intervalle représente le domaine de validité du superviseur dont le support est $R_{s_i}^l(0) = [-r_{c_i}(t), 1-r_{c_i}(t)]$, le noyau est $R_{s_i}^l(1) = 0$ et les profils gauche et droit sont respectivement $(R_{s_i}^l)^-(\alpha) = (1-\alpha) \cdot (-r_{c_i}(t))$ et $(R_{s_i}^l)^+(\alpha) = (1-\alpha) \cdot (1-r_{c_i}(t))$ (Cf. Figure 3.32).

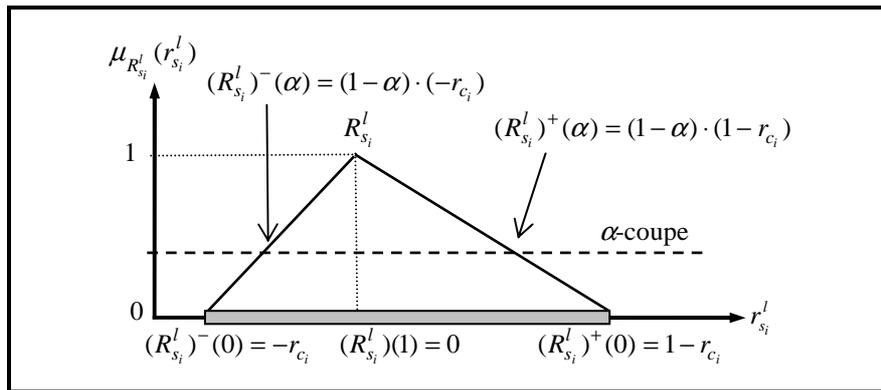


Figure 3.32 : Domaine de validité de la loi de supervision.

Dans ce cas, l'élaboration de la composante de supervision relative à P_l se résume à déterminer sur l'intervalle flou $R_{s_i}^l$ la valeur associée au niveau de coupe α de la performance de P_l . En d'autres termes, le degré d'appartenance de la mesure de P_l à son intervalle de tolérance est « défuzzifié » sur l'intervalle flou $R_{s_i}^l$. Ce principe est illustré sur la Figure 3.33.

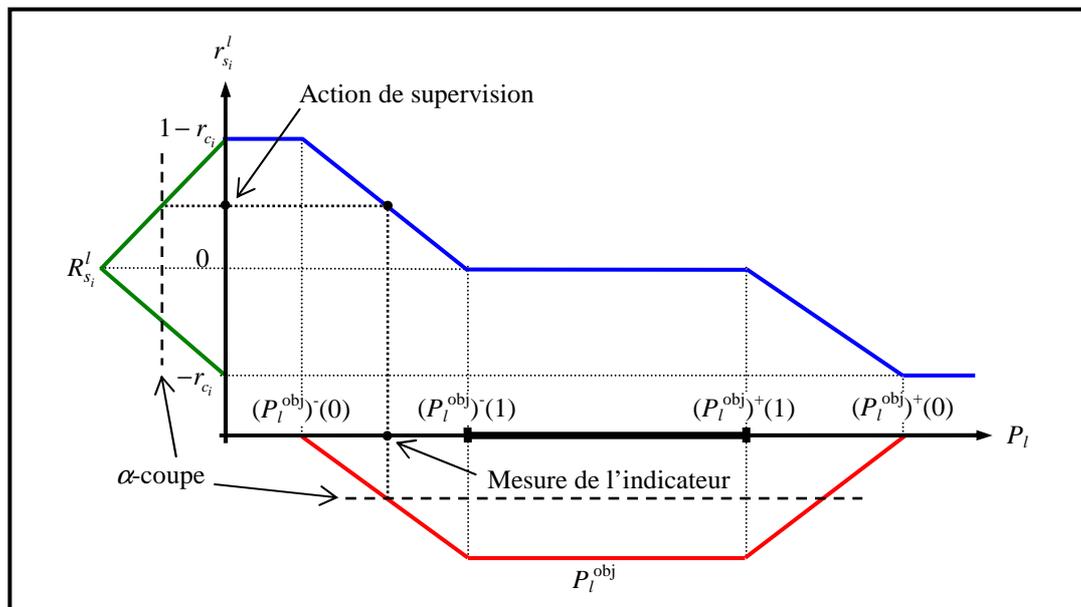


Figure 3.33 : Les commutations de l'action du superviseur pour l'indicateur de performance P_l .

Contrairement à la supervision par intervalles conventionnels (Cf. Figure 3.16), les commutations de la loi de supervision sont plus douces. En effet, le passage entre les modes de fonctionnement normal et dégradé est conduit par les fonctions de profils où les commutations de la loi de supervision s'effectuent graduellement.

C. Principe d'agrégation des actions

Le sélectionneur détaillé précédemment nous permet de déterminer pour chaque indicateur de performance l'action de supervision associée. Les différentes actions $r_{s_i}^l(t)$, $l = 1, \dots, L$ sont alors combinées afin de générer l'action de supervision agrégée (composante additive).

A titre d'exemple, l'expression de la composante additive $r_{s_i}(t)$ peut être obtenue à l'aide de l'opérateur de la moyenne arithmétique. En effet, cette moyenne arithmétique correspond à la somme pondérée (3.29), en fixant tous les poids à la même valeur. Soit :

$$w_l = \frac{1}{L}, \forall l \tag{3.48}$$

Ce choix d'opérateur peut s'avérer pertinent compte tenu que la représentation par profils pondère l'action élaborée pour chaque indicateur via son niveau de coupe. Bien évidemment, d'autres opérateurs d'agrégation peuvent être appliqués.

La Figure 3.34 illustre le synoptique du mécanisme de supervision détaillé dans cette partie.

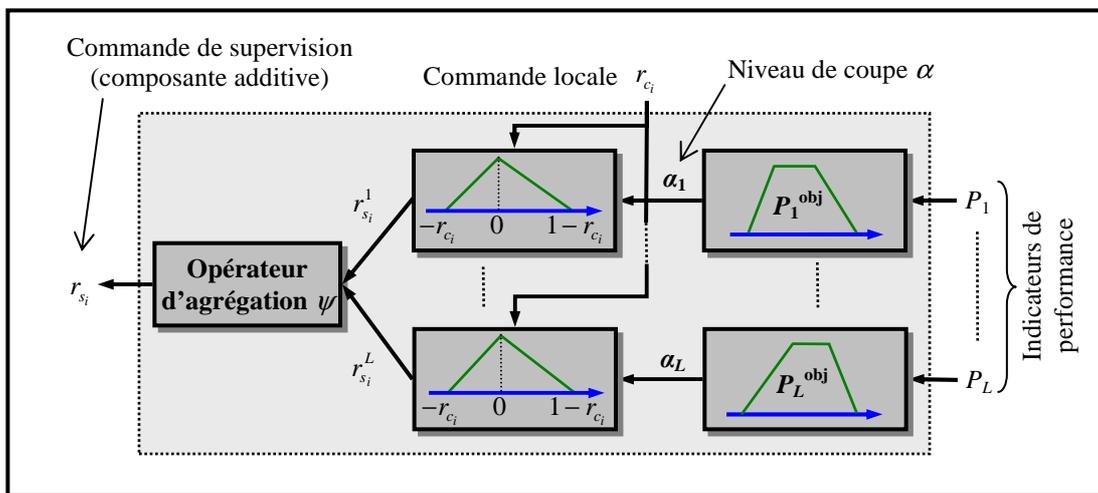


Figure 3.34 : Mécanisme de supervision par agrégation des actions.

D. Exemple illustratif

A titre illustratif, nous considérons les indicateurs de performance utilisés pour la supervision à base d'intervalles conventionnels en les représentant ici par des intervalles flous. Leurs supports et noyaux sont donnés par (Cf. Figure 3.35) :

$$P_1^{obj} = \begin{cases} P_1^{obj}(0) = [-3, +3] \\ P_1^{obj}(1) = [-1, +1] \end{cases}; P_2^{obj} = \begin{cases} P_2^{obj}(0) = [-3, +3] \\ P_2^{obj}(1) = [-1, +1] \end{cases}; P_3^{obj} = \begin{cases} P_3^{obj}(0) = [2, 7] \\ P_3^{obj}(1) = [3, 6] \end{cases}$$

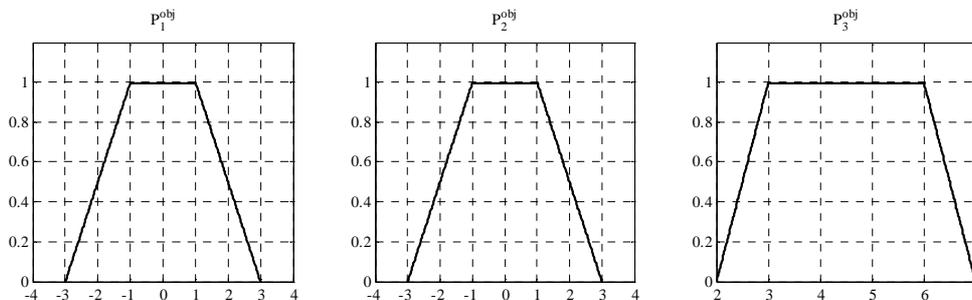


Figure 3.35 : Les intervalles flous des indicateurs de performance.

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures ci-dessous. La Figure 3.36, la Figure 3.37 et la Figure 3.38 donnent un comparatif entre l'évolution des indicateurs P_1 , P_2 et P_3 vis-à-vis de leurs intervalles de tolérance en considérant la représentation par intervalles conventionnels (résultats obtenus précédemment) et par intervalles flous.

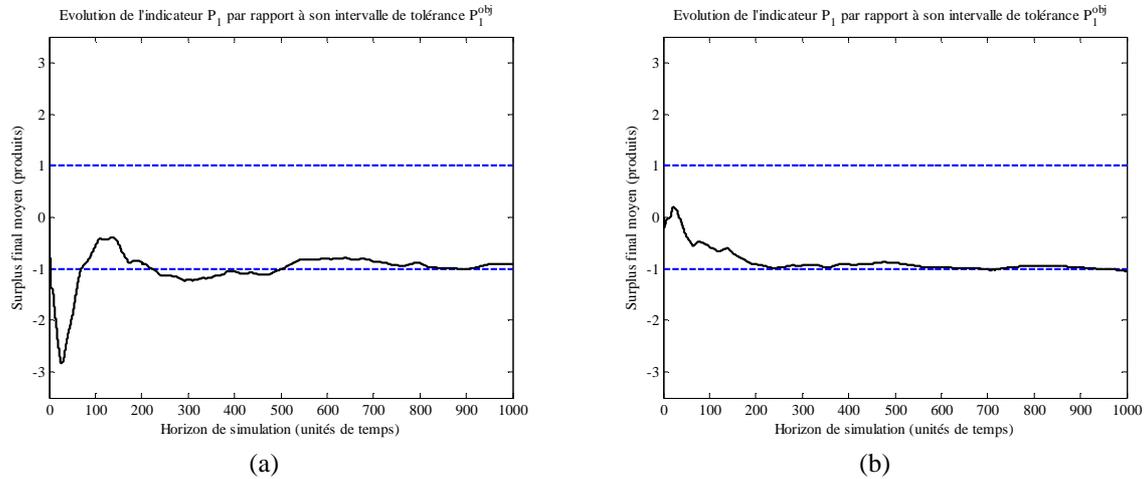


Figure 3.36 : Surplus final moyen P_1 en supervision : (a) par intervalles conventionnels, (b) par intervalles flous.

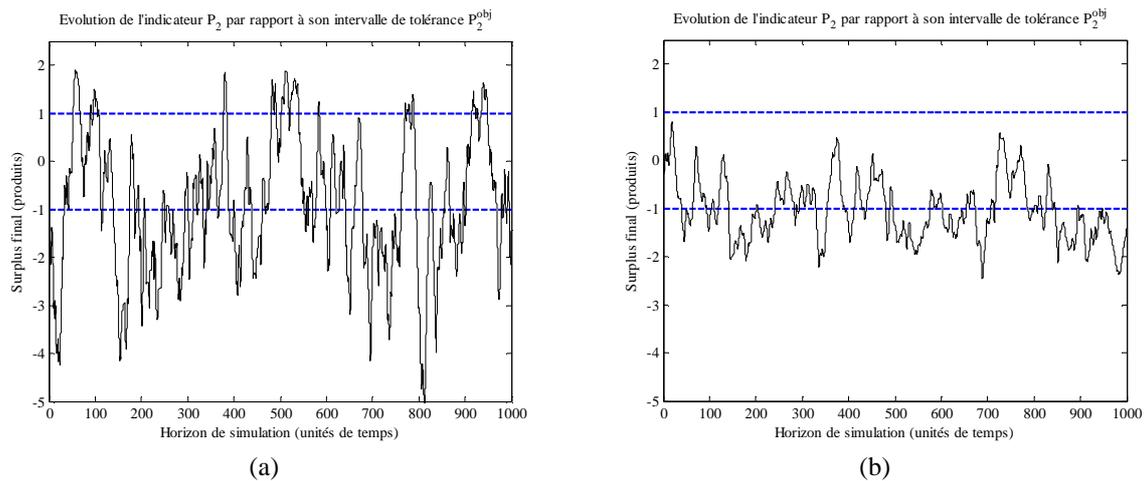


Figure 3.37 : Surplus final P_2 en supervision : (a) par intervalles conventionnels, (b) par intervalles flous.

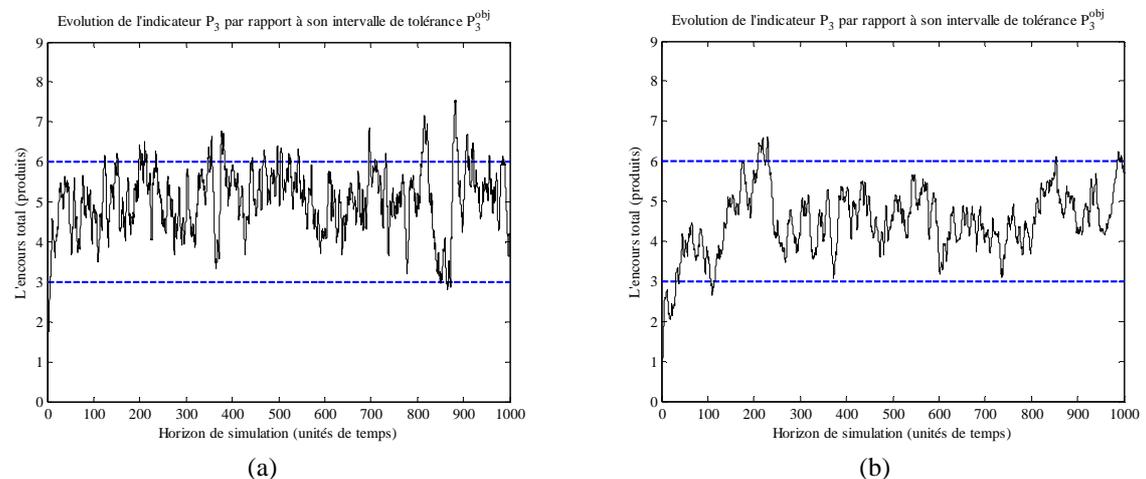


Figure 3.38 : L'encours P_3 en supervision : (a) par intervalles conventionnels, (b) par intervalles flous.

La Figure 3.39.a et la Figure 3.39.b montrent les tendances du retard sur la production et de l'encours.

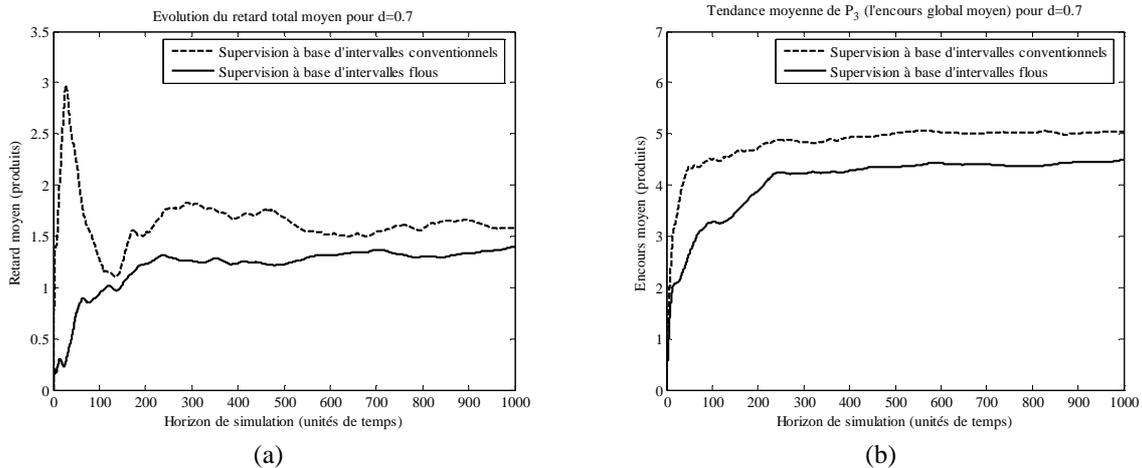


Figure 3.39 : Tendances moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.

La Figure 3.40 donne l'évolution de la loi de supervision du dernier module $MPC(4)$ de la ligne de transformation contrôlée.

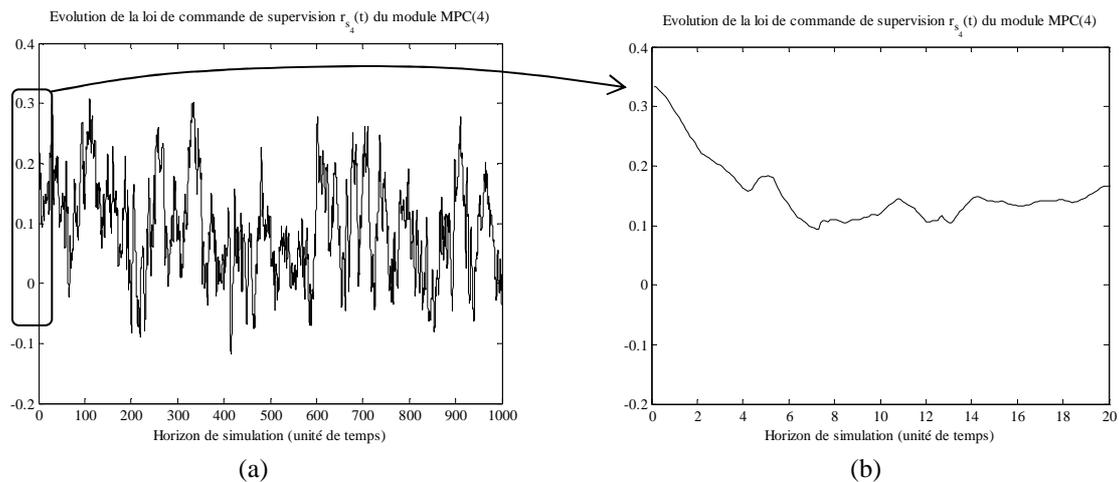


Figure 3.40 : Evolution de la loi de supervision du dernier module de la ligne de transformation.

Globalement, la tendance des différents résultats illustre des performances comparables avec celles obtenues avec la supervision à base d'intervalles conventionnels. Toutefois, les résultats obtenus avec les intervalles flous sont plus affinés et plus stables. Cela est en particulier dû au remplacement des commutations franches par des commutations douces à travers la représentation par intervalles flous.

Dans les deux démarches de synthèse proposées, l'action relative à chaque indicateur est déterminée, ensuite l'ensemble des actions obtenues sont agrégées afin d'élaborer la composante additive de supervision. Cette procédure, qui a montré de bonnes performances en simulation, est cependant moins viable dans la situation où le décideur souhaite accorder des préférences aux différents objectifs spécifiés. Cette situation peut être considérée en agrégeant non pas les actions mais les mesures des indicateurs ainsi que leurs objectifs.

4.2.2. Mécanisme de supervision par agrégation des objectifs

Dans cette partie, nous proposons une autre philosophie pour l'élaboration de l'action du superviseur basée sur l'agrégation des indicateurs (valeurs mesurées) et leurs objectifs (valeurs souhaitées). En effet, partant de la représentation des objectifs P_l^{obj} par des intervalles flous, la démarche de synthèse adoptée se décompose en trois étapes :

1. L'agrégation des objectifs $P_1^{obj}, \dots, P_L^{obj}$ associés aux indicateurs de performance P_1, \dots, P_L . Cette phase consiste à déterminer, via un opérateur Ψ , l'expression de l'objectif agrégé représenté par l'intervalle flou suivant :

$$P_{ag}^{obj} = \Psi[P_1^{obj}, \dots, P_L^{obj}] \tag{3.49}$$

où Ψ est l'opérateur d'agrégation incertain sur les intervalles flous associés aux objectifs.

2. L'agrégation des mesures associées aux indicateurs P_1, \dots, P_L . La mesure agrégée P_{ag} est calculée via un opérateur d'agrégation comme suit :

$$P_{ag} = \psi(P_1, \dots, P_L) \tag{3.50}$$

où ψ est la version précise de l'opérateur Ψ .

3. L'évaluation (comparaison) de la mesure agrégée P_{ag} par rapport à son objectif P_{ag}^{obj} . Cette opération revient à « fuzzifier » la valeur précise P_{ag} sur l'intervalle flou P_{ag}^{obj} afin de définir son degré d'appartenance. Autrement dit, déterminer sa coupe de niveau α . A partir de cette valeur de α , la loi de supervision est synthétisée selon la démarche développée dans la partie précédente. Dans ce cas, le même principe détaillé précédemment pour chaque intervalle flou P_l^{obj} et la mesure associée à P_l est directement transposable.

La Figure 3.41 illustre le synoptique du mécanisme de supervision par agrégation des indicateurs (mesures et objectifs).

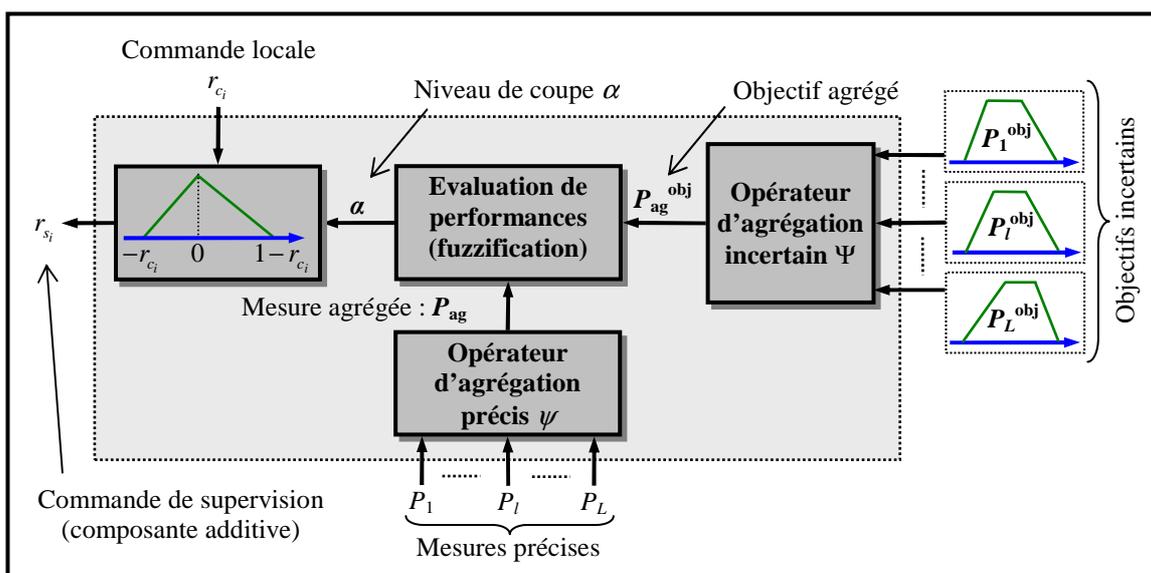


Figure 3.41 : Mécanisme de supervision par agrégation des indicateurs (mesures et objectifs).

4.2.2.1. Agrégation des objectifs

Comme développé dans le paragraphe précédent, les objectifs associés aux différents indicateurs de performance P_i^{obj} sont représentés par des intervalles flous. Ces derniers sont complètement définis par leurs fonctions de profils gauche et droit. L'agrégation des objectifs dans ce cas revient à effectuer des opérations arithmétiques sur les intervalles flous les représentant.

Pour pouvoir exploiter les opérateurs d'agrégation à travers des intervalles flous, nous rappelons ici les opérations conventionnelles sur ces derniers.

A. Opérations sur les intervalles flous

Soit A et B deux intervalles flous définis par leurs fonctions des profils comme suit :

$$A(\alpha) = [A^-(\alpha), A^+(\alpha)] \text{ et } B(\alpha) = [B^-(\alpha), B^+(\alpha)] \quad (3.51)$$

Les quatre opérations arithmétiques standards ainsi que les opérations minimum et maximum sont définies comme suit [Klir, 1997 ; Boukezzoula et al., 2006, 2007a] :

- **L'addition**

$$(A \oplus B)(\alpha) = [A^-(\alpha) + B^-(\alpha), A^+(\alpha) + B^+(\alpha)] \quad (3.52)$$

- **La soustraction**

$$(A \ominus B)(\alpha) = [A^-(\alpha) - B^+(\alpha), A^+(\alpha) - B^-(\alpha)] \quad (3.53)$$

- **La multiplication**

$$(A \otimes B)(\alpha) = [\min \Xi(\alpha), \max \Xi(\alpha)], \quad (3.54)$$

avec : $\Xi(\alpha) = \{A^-(\alpha) \cdot B^-(\alpha), A^-(\alpha) \cdot B^+(\alpha), A^+(\alpha) \cdot B^-(\alpha), A^+(\alpha) \cdot B^+(\alpha)\}$

- **La division**

$$(A \oslash B)(\alpha) = [A^-(\alpha), A^+(\alpha)] \otimes [1/B^-(\alpha), 1/B^+(\alpha)], \quad (3.55)$$

avec B , est tel que : $0 \notin S(B) = B(0)$

- **Le minimum et le maximum**

Les opérations minimum MIN et maximum MAX de deux intervalles flous A et B sont définies à partir du principe d'extension de Zadeh [Zadeh, 1965 ; Klir and Yuan, 1995 ; Blohlavek, 2000 ; Chiu and Wang, 2002 ; Boukezzoula et al., 2007b] comme suit :

$$\begin{cases} MIN(A, B)(z) = \text{Sup}_{z=\min(x,y)} \min(A(x), B(y)) \\ MAX(A, B)(z) = \text{Sup}_{z=\max(x,y)} \min(A(x), B(y)) \end{cases} \quad (3.56)$$

Pour tout $x \in X$, $y \in Y$ et $z \in Z$ avec $X = Y = Z = \mathfrak{R}$.

A titre d'illustration, nous décrivons cette approche sur l'opérateur « somme pondérée » et « somme ordonnée », ensuite nous donnons une description dans le cas de l'intégrale de Choquet sous sa forme 2-additive [Grabisch and Roubens, 2000].

B. Application à la somme pondérée et/ou à la somme ordonnée

Dans le cas de la somme pondérée, l'opération Ψ revient à agréger les L intervalles flous P_l^{obj} en effectuant des opérations standards comme suit :

$$P_{\text{ag}}^{\text{obj}} = [(P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-, (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+] = \Psi[P_1^{\text{obj}}, \dots, P_L^{\text{obj}}] = \sum_{l=1, \dots, L}^{\oplus} w_l \cdot P_l^{\text{obj}} \quad (3.57)$$

où l'opérateur (\sum^{\oplus}) représente la somme entre intervalles flous. Les poids w_l associés aux objectifs (intervalles flous) ont pour but de représenter son importance dans le résultat agrégé et doivent vérifier les propriétés (3.12).

Si une relation d'ordre ou de préférence sur les objectifs est spécifiée, il serait alors intéressant d'exploiter l'opérateur OWA donné par l'expression (3.13). Ainsi, l'expression de la somme pondérée (3.57) devient la suivante :

$$P_{\text{ag}}^{\text{obj}} = [(P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-, (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+] = \Psi[P_1^{\text{obj}}, \dots, P_L^{\text{obj}}] = \sum_{l=1, \dots, L}^{\oplus} w_l \cdot [P_l^{\text{obj}}]_{(l)} \quad (3.58)$$

où la notation (l) indique une permutation des indices pour respecter la relation d'ordre \preceq entre les intervalles flous exprimée comme suit :

$$[P_l^{\text{obj}}]_{(1)} \preceq [P_l^{\text{obj}}]_{(2)} \preceq \dots \preceq [P_l^{\text{obj}}]_{(L)} \quad (3.59)$$

C. Application à l'intégrale de Choquet 2-additive

La démarche de supervision par agrégation d'objectifs sur la base de l'opérateur de la somme pondérée repose sur l'hypothèse que les interactions entre les indicateurs sont nulles, c'est-à-dire que leurs évolutions sont indépendantes. Dans la réalité, cette hypothèse est rarement vérifiée. Dans ce contexte, la prise en compte des interactions mutuelles implique l'emploi d'autres opérateurs tels que l'intégrale de Choquet. En effet, les opérateurs de la famille de l'intégrale de Choquet couvrent une large gamme d'opérateurs dont la somme pondérée, la somme pondérée ordonnée, etc., et ils sont capables de prendre en compte les interactions. Dans notre approche de supervision, nous proposons d'appliquer le cas particulier de l'intégrale de Choquet 2-additive [Grabisch and Roubens, 2000 ; Grabisch et Perny, 2003 ; Meyer and Roubens, 2006 ; Denguir-Rekik et al., 2006].

L'extension de l'intégrale de Choquet 2-additive, donnée par la relation (3.15), à l'agrégation des intervalles flous (informations incertaines) est donnée par l'expression suivante [Boukezzoula et al., 2007b] :

$$\Psi[P_1^{\text{obj}}, \dots, P_L^{\text{obj}}] = CI[P_1^{\text{obj}}, \dots, P_L^{\text{obj}}] = \sum_{I_{lk} > 0}^{\oplus} \text{MIN}[P_l^{\text{obj}}, P_k^{\text{obj}}] \cdot I_{lk} \oplus \sum_{I_{lk} < 0}^{\oplus} \text{MAX}[P_l^{\text{obj}}, P_k^{\text{obj}}] \cdot |I_{lk}| \oplus \sum_{l=1, \dots, L}^{\oplus} P_l^{\text{obj}} \cdot \left(\phi_l - \frac{1}{2} \sum_{k \neq l} |I_{lk}| \right) \quad (3.60)$$

Les opérations *MIN* et *MAX* sur les intervalles flous sont données conformément à (3.56). L'expression analytique des opérateurs *MIN* et *MAX* est donnée dans [Boukezzoula et al., 2007b ; Megri et Boukezzoula, 2008a, 2008b].

4.2.2.2. Construction de l'action de supervision

Le principe détaillé précédemment pour un indicateur P_l et son objectif P_l^{obj} est exploité ici pour la mesure agrégée P_{ag} et l'objectif global agrégé $P_{\text{ag}}^{\text{obj}}$. En effet, pour une valeur précise de la mesure agrégée P_{ag} sa coupe de niveau α est déterminée. Dans ce cas, pour la valeur de α obtenue, l'action du superviseur est définie, conformément à l'expression (3.46), comme suit :

$$r_{s_i}(t) = \begin{cases} (1-\alpha)(1-r_{c_i}(t)) & , \text{ si } P_{\text{ag}} < (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-(1) \\ 0 & , \text{ si } \in (P_{\text{ag}}, P_{\text{ag}}^{\text{obj}}(1)) \\ (1-\alpha)(-r_{c_i}(t)) & , \text{ si } P_{\text{ag}} > (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+(1) \end{cases} \quad (3.61)$$

L'ensemble des valeurs de $r_{s_i}(t)$ définissent l'intervalle flou R_{s_i} représentant le domaine de validité de la loi de supervision (Cf. Figure 3.32).

Finalement, en appliquant la relation (3.47) à P_{ag} et $P_{\text{ag}}^{\text{obj}}$, il résulte :

$$r_{s_i}(t) = \notin (P_{\text{ag}}, P_{\text{ag}}^{\text{obj}}(1)) \cdot (\Delta(P_{\text{ag}}, P_{\text{ag}}^{\text{obj}}(1)) - r_{c_i}(t)) \cdot (1-\alpha) \quad (3.62)$$

4.2.2.3. Exemple illustratif

Nous illustrons les performances du mécanisme de supervision donné dans cette partie sur l'exemple de la ligne de production à 4 modules de transformation. Nous considérons les trois indicateurs de performance P_1, P_2, P_3 et leurs intervalles de tolérance illustrés sur la Figure 3.35. Dans les simulations, nous adoptons deux opérateurs d'agrégation : la moyenne arithmétique et l'intégrale de Choquet 2-additive. L'objectif ici est de montrer l'effet de la prise en compte des interactions entre les différents indicateurs utilisés dans la supervision.

Dans le cas de l'intégrale de Choquet, les indices de Shapley ϕ_l dans (3.15) et (3.60) sont choisis tous identiques, *i.e.*, $\phi_l = 1/3$ pour $l = 1, 2, 3$. Compte tenu d'une part de la similarité des performances liées aux indicateurs P_1 et P_2 , et d'autre part, de la contradiction entre les indicateurs P_1 et P_3 ainsi que P_2 et P_3 , les coefficients d'interaction sont fixés comme suit :

$$I_{12} = -0.3, I_{13} = 0.2 \text{ et } I_{23} = 0.2$$

Les objectifs flous illustrés sur la Figure 3.35 peuvent être formalisés par les profils gauche et droit comme suit :

$$\begin{cases} P_1^{\text{obj}}(\alpha) = [(P_1^{\text{obj}})^-(\alpha), (P_1^{\text{obj}})^+(\alpha)] = [(-3 + 2\alpha), (3 - 2\alpha)] \\ P_2^{\text{obj}}(\alpha) = [(P_2^{\text{obj}})^-(\alpha), (P_2^{\text{obj}})^+(\alpha)] = [(-3 + 2\alpha), (3 - 2\alpha)] \\ P_3^{\text{obj}}(\alpha) = [(P_3^{\text{obj}})^-(\alpha), (P_3^{\text{obj}})^+(\alpha)] = [(2 + \alpha), (7 - \alpha)] \end{cases}$$

A partir de la représentation des objectifs $P_i^{\text{obj}}(\alpha)$, l'expression agrégée s'obtient en effectuant des opérations standards sur les intervalles flous. Ainsi, dans le cas de l'agrégation par l'opérateur de la moyenne arithmétique, nous obtenons l'expression suivante :

$$P_{\text{ag}}^{\text{obj}}(\alpha) = [(P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-(\alpha), (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+(\alpha)] = \begin{cases} (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-(\alpha) = \frac{5}{3}\alpha - \frac{4}{3} \\ (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+(\alpha) = -\frac{5}{3}\alpha + \frac{13}{3} \end{cases}$$

Dans le cas de l'agrégation par l'intégrale de Choquet 2-additive, l'expression de l'intervalle flou agrégé est donnée par :

$$P_{\text{ag}}^{\text{obj}}(\alpha) = [(P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-(\alpha), (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+(\alpha)] = \begin{cases} (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^-(\alpha) = \frac{28}{15}\alpha - \frac{7}{3} \\ (P_{\text{ag}}^{\text{obj}})^+(\alpha) = -\frac{28}{15}\alpha + \frac{53}{15} \end{cases}$$

La forme de l'intervalle flou de l'objectif agrégé pour chacun des cas est illustrée sur la Figure 3.42.

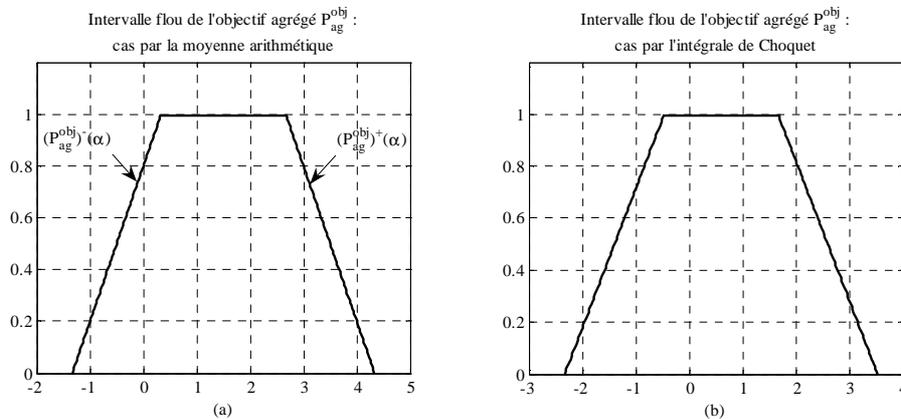


Figure 3.42 : L'intervalle flou agrégé $P_{\text{ag}}^{\text{obj}}$: (a) par la moyenne arithmétique, (b) par l'intégrale de Choquet.

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures ci-dessous. La Figure 3.43, la Figure 3.44 et la Figure 3.45 représentent l'évolution des indicateurs P_1 , P_2 et P_3 en utilisant la moyenne arithmétique et l'intégrale de Choquet 2-additive.

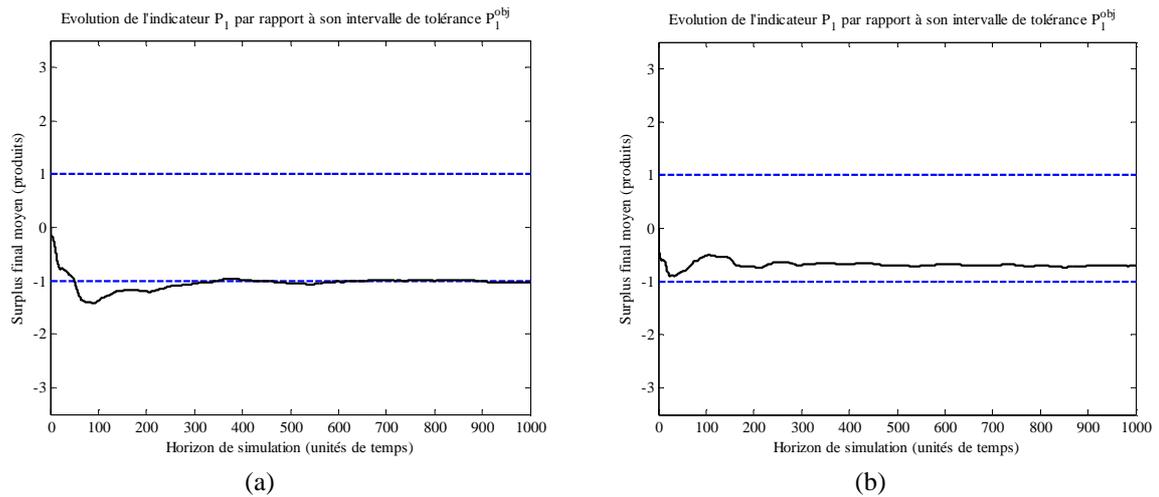


Figure 3.43: Surplus final moyen P_1 , agrégation: (a) par la moyenne arithmétique, (b) par l'intégrale de Choquet.

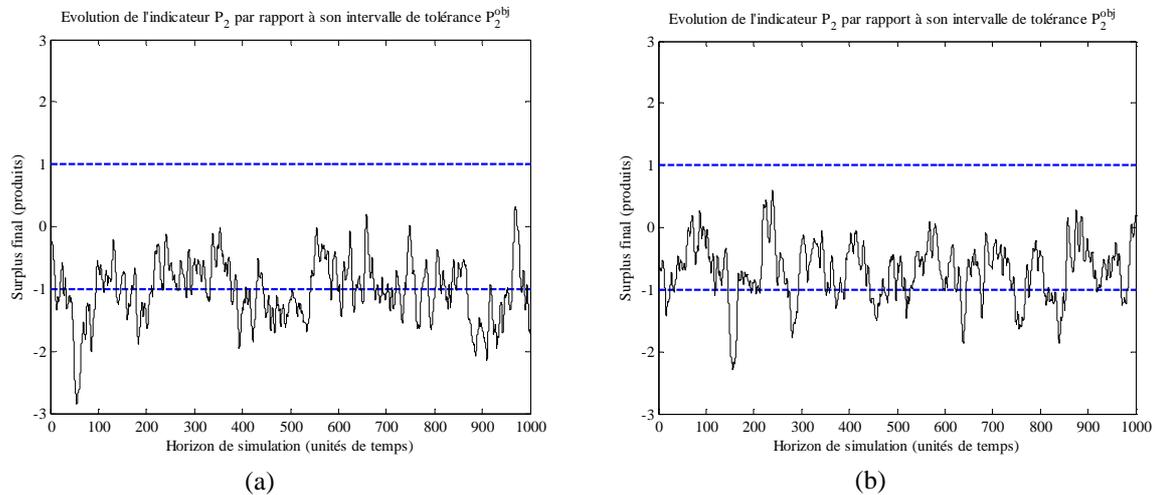


Figure 3.44 : Surplus final P_2 , agrégation : (a) par la moyenne arithmétique, (b) par l'intégrale de Choquet.

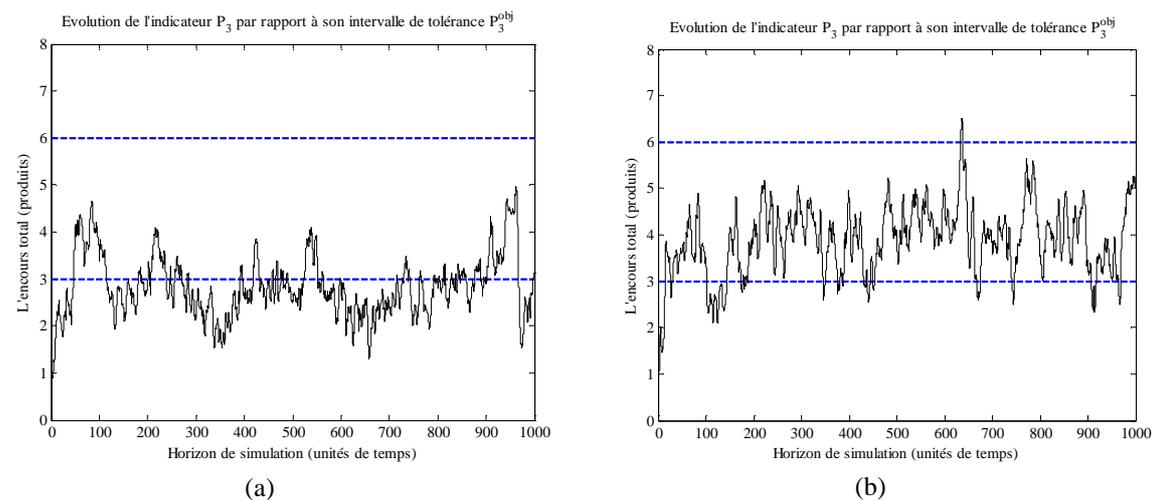


Figure 3.45 : L'encours P_3 , agrégation : (a) par la moyenne arithmétique, (b) par l'intégrale de Choquet.

La Figure 3.46.a montre l'évolution du retard moyen tandis que la Figure 3.46.b donne la tendance de l'encours.

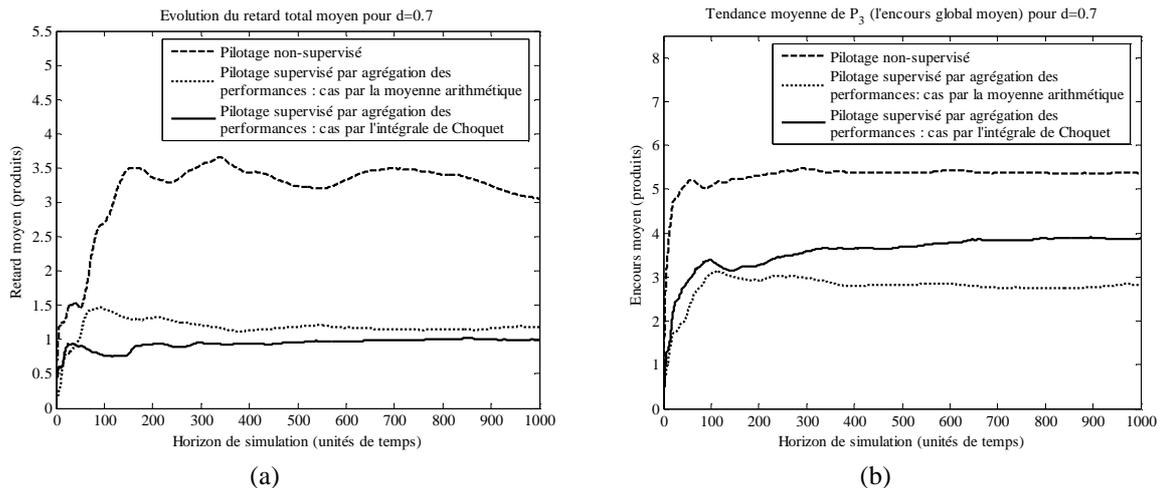


Figure 3.46 : Tendances moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.

Ces résultats montrent clairement une amélioration des différentes performances par rapport au cas non supervisé (Cf. Figure 3.46). Les performances obtenues par supervision via l'opérateur de l'intégrale de Choquet par rapport à l'opérateur de la moyenne montrent un compromis entre le retard et l'encours dans le sens de l'amélioration du premier au détriment du second mais tout en restant dans le domaine du fonctionnement admissible du système (Cf. Figure 3.43, Figure 3.44 et Figure 3.45).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé, formalisé et validé des méthodologies de conception d'un superviseur pour le pilotage des flux. En effet, dans la synthèse du superviseur, nous avons distingué deux approches. La première est basée sur le formalisme flou (agrégation par règles floues). Bien qu'elle permette une amélioration des performances du système, elle présente néanmoins un inconvénient majeur si le nombre d'indicateurs de performance augmente. L'explosion combinatoire du nombre de règles, leur signification et leur obtention deviennent alors des sérieux handicaps.

La deuxième méthode de supervision proposée permet de contourner ce problème en introduisant un mécanisme d'agrégation à base d'opérateurs mathématiques. Dans ce cadre, nous avons développé deux techniques :

- La première consiste à décider dans un premier temps de l'action de supervision relative à chaque indicateur et ensuite agréger les différentes actions obtenues conformément à l'opérateur d'agrégation choisi.
- La deuxième approche revient à agréger les mesures des indicateurs et leurs objectifs associés pour ensuite construire la composante additive de supervision en fonction de la performance obtenue.

Ces deux approches présentent des différences en termes d'exploitation. En effet, l'agrégation des actions est dédiée à des applications où aucune préférence ou interaction n'est attribuée aux indicateurs, tandis que l'agrégation des objectifs s'apparente à des applications dans lesquelles des préférences, des confiances et des interactions sont clairement énoncées et associées aux objectifs.

Les performances des différents mécanismes de supervision proposés sont assez proches. Toutefois, les mécanismes à base d'intervalles flous présentent l'avantage d'adoucir les commutations entre les différents modes de fonctionnement du système qui peuvent être source d'instabilité pour ce dernier. De plus, l'approche d'agrégation des objectifs permet de mieux considérer les situations conflictuelles.

Bien que les résultats de simulation obtenus soient très encourageants, il reste à valider cette approche sur des applications complexes. En effet, les tests de simulation effectués jusqu'à présent sont à titre illustratif, sur un exemple académique choisi volontairement simple. Il est alors indispensable de mieux appréhender notre approche sur des exemples complexes et des données réelles. Le chapitre suivant est alors dédié à la validation de l'approche de pilotage proposée.

CHAPITRE 4

Applications et résultats de simulation

Chapitre 4 : Applications et résultats de simulation

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de valider la faisabilité de l'approche de commande et de supervision développée dans les précédents chapitres. Les performances du pilotage sont évaluées par simulation sous MATLAB/Simulink et la librairie Floulib [Foulloy et al., 2006].

Dans la première partie de ce chapitre, nous donnons l'extension de l'approche de pilotage aux cas de systèmes multi-produits. Dans ce contexte, il s'agit de définir une stratégie permettant une distribution de la capacité de chaque module de production sur les différents types de produits qu'il traite. Un exemple simple à deux types de produits est considéré pour illustrer ce cas.

Dans la deuxième partie, nous déclinons et validons notre approche sur deux exemples complexes et plus proche de la réalité. Le premier est un système de production organisé en job-shop incluant des opérations de transformation, d'assemblage et de désassemblage avec des séquences d'opérations cycliques. L'objectif étant d'une part, de tester la robustesse de notre approche en présence d'aléas de fonctionnement (pannes, demandes aléatoires) et d'autre part, de comparer les résultats obtenus par rapport à une autre technique de supervision donnée dans [Ioannidis et al., 2004].

La présence des phases cycliques dans un processus de fabrication est l'une des caractéristiques de l'industrie des semi-conducteurs dont la densité des flux de produits est quasiment de nature continue [Wein, 1988 ; Bispo, 1997 ; Vargas-Villamil et al., 2003 ; Wang et al., 2007]. Dans ce contexte, nous proposons un cas pratique d'une installation à deux processus de fabrication de semi-conducteurs produisant deux types de produits où uniquement des processus de transformation sont présents. L'objectif de cette application est de valider la structure de pilotage sur des données réelles en considérant des objectifs antagonistes.

2. Les systèmes multi-produits

Dans les systèmes de production réels, les flux des produits peuvent être de différents types (cas multi-produit), dont les séquences d'opérations partagent les mêmes ressources, et intégrant des phases cycliques (rebouclage sur la même ressource). Ces caractéristiques impliquent une distribution des capacités des ressources de production sur les différents flux qu'elles traitent. L'objectif de ce paragraphe consiste à décrire le déploiement de la stratégie de pilotage (commande locale et supervision) développée précédemment au cas multi-produit et en présence de séquences d'opérations cycliques.

2.1. Hypothèses et positionnement du problème

Nous considérons les notations données précédemment pour décrire un système de production à N modules $MP(i)$. Ce dernier est capable de produire un ensemble de J produits de types différents $\{j\}_{j=1,\dots,J}$.

On définit par $Q(i)$ l'ensemble des produits de type différent que le module $MP(i)$ peut traiter. Chaque flux de produits de type $j \in Q(i)$ peut invoquer k ($k = 1, \dots, K_{ij}$) différentes opérations sur le module $MP(i)$. Si $K_{ij} > 1$, alors le flux de type j comporte des phases cycliques sur le module $MP(i)$. Autrement dit, le flux de type j est traité K_{ij} fois sur le module $MP(i)$.

Nous supposons que tous les produits commandés peuvent être fabriqués au cours de l'horizon de production planifié, ou encore que la capacité est suffisante pour que toutes les demandes soient satisfaites. Dans ce cas, la condition de faisabilité (2.32), exprimée pour le cas mono-produit, doit être vérifiée pour l'ensemble $Q(i)$ des produits traités sur chaque module $MP(i)$. Autrement dit, le système doit satisfaire la condition suivante :

$$\sum_{\{j|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk} \leq e_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.1)$$

avec d_j le taux de demande du produit de type j , τ_{ijk} le temps opératoire de la $k^{\text{ième}}$ opération du flux de produits de type j sur le module $MP(i)$ et e_i , donnée par la relation (2.33), représente la disponibilité intrinsèque du module $MP(i)$ lorsqu'il est pris seul. Ainsi, le problème se décline dans ce cas en terme de distribution de la capacité maximale de chaque module de production $MP(i)$ sur tous les produits de l'ensemble $Q(i)$ sous la condition (4.1). Autrement dit, il s'agit de synthétiser un module de contrôle $MC(i)$ capable d'allouer à chaque instant une fraction de la capacité du module $MP(i)$ sur les différentes opérations par type de produit qu'il traite, et par conséquent, fixer leurs taux de production.

Par ailleurs, en plus des hypothèses sur les paramètres de fiabilité des machines données précédemment, nous émettons celles qui suivent concernant à la fois le système physique et le système de pilotage :

- Les objectifs du pilotage sont quantifiés pour chaque type de produits j ($j = 1, \dots, J$) par les intervalles $P_{j1}^{\text{obj}}, \dots, P_{jL}^{\text{obj}}$ et évalués à travers les indicateurs de performance P_{j1}, \dots, P_{jL} . Ces intervalles délimitent les zones de fonctionnement admissibles du système.
- La trajectoire de la demande au cours du temps peut être linéaire de taux constant ou faiblement fluctuante suivant un processus stochastique de distribution de poisson.
- Les machines sont suffisamment flexibles pour négliger les temps de changement d'outils, et les temps de transfert ne sont pas pris en compte.
- La séquence de production ou le routage de chaque type de produit est fixe et donnée.

2.2. Décomposition et allocation de capacité

L'objectif de ce paragraphe est de généraliser le mécanisme d'allocation de capacité du cas mono-produit au cas multi-produits. Comme il a été souligné au précédent paragraphe, la difficulté majeure réside dans la distribution de la capacité maximale de chaque module de production aux différents types de produits qu'il traite. Pour cela, nous adoptons une décomposition de chaque module multi-produit en sous-modules mono-produits en tenant compte de ses propriétés à savoir sa disponibilité intrinsèque et la capacité nécessaire pour chaque opération traitée (son temps opératoire). Ainsi, le déploiement de la structure de pilotage (commande locale et supervision) s'effectue conformément à la démarche développée pour le cas mono-produit.

2.2.1. Décomposition

Afin de définir la capacité allouée pour chacune des opérations k (son taux de production) exécutées sur un module multi-produit $MP(i)$, nous divisons « virtuellement » le module $MP(i)$ en autant de sous-modules que d'opérations par type de flux de produits de l'ensemble $Q(i)$ [Bai and Gershwin, 1994]. Autrement dit, le module multi-produits $MP(i)$ se décompose en $\left(\sum_{\{j|j \in Q(i)\}} K_{ij} \right)$ sous-modules mono-produits, notés $mp(i, j, k)$, schématisés en pointillés sur la Figure 4.1.

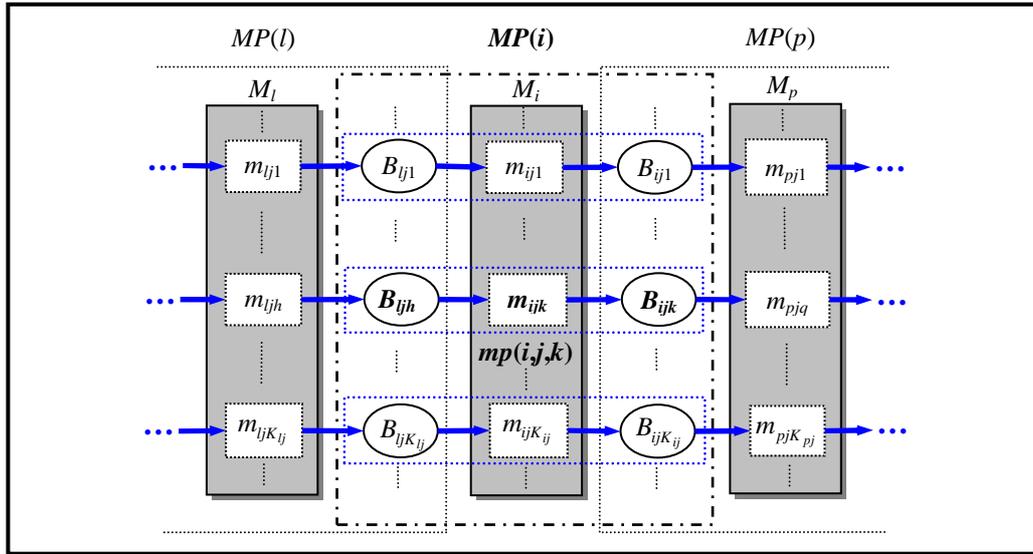


Figure 4.1 : Décomposition d'un module multi-produit en sous-modules mono-produits.

Ainsi, chaque sous-module $mp(i, j, k)$ regroupe la sous-machine m_{ijk} exécutant la $k^{\text{ième}}$ opération du flux de produits de type j et les ensembles de ses stocks amonts et aval, notés respectivement par $B_+(i, j, k)$ et $B_-(i, j, k)$. Soit alors :

$$MP(i) = \{mp(i, j, k) \mid j \in Q(i) ; k = 1, \dots, K_{ij}\} \text{ et } mp(i, j, k) = \{B_+(i, j, k), m_{ijk}, B_-(i, j, k)\}$$

La conception du sous-module de contrôle $mc(i, j, k)$ associé au sous-module de production $mp(i, j, k)$ se ramène alors au cas mono-produit détaillé dans le Chapitre 2.

2.2.2. Allocation de capacité

En suivant un raisonnement similaire au cas mono-produit, la loi de commande globale générée par le système de pilotage, traduisant à chaque instant le taux de production $u_{ijk}(t)$ du sous-module $mp(i, j, k)$, est donnée par :

$$u_{ijk}(t) = r_{ijk}(t) u_{ijk}^{\max} = (r_{c_{ijk}}(t) + r_{s_{ijk}}(t)) \cdot u_{ijk}^{\max} \quad (4.2)$$

avec :

- $r_{c_{ijk}}(t) \in [0, 1]$ est la commande locale générée par le sous-module de contrôle flou $mc(i, j, k)$.
- $r_{s_{ijk}}(t) \in [-r_{c_{ijk}}(t), 1 - r_{c_{ijk}}(t)]$ est la loi de supervision (composante additive) associée au sous-module $mp(i, j, k)$, synthétisée suivant le mécanisme développé dans le Chapitre 3.

- u_{ijk}^{\max} est le taux de production maximal du sous-module $mp(i, j, k)$ calculé de la façon suivante :

$$u_{ijk}^{\max} = A_{ijk} \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ijk}} \right) \quad (4.3)$$

où :

$$A_{ijk} = \left(\frac{d_j \tau_{ijk}}{\sum_{\{j|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk}} \right) \quad (4.4)$$

Le terme A_{ijk} fournit la fraction de la charge totale en production (machine load) du module $MP(i)$ allouée au sous-module $mp(i, j, k)$. Dans (4.4), le numérateur représente la charge en production du sous-module $mp(i, j, k)$ nécessaire pour satisfaire la demande d_j . Le dénominateur désigne la charge totale requise pour satisfaire toutes les demandes des flux de produits de l'ensemble $Q(i)$. Ce terme doit vérifier la condition de faisabilité (4.1).

En pondérant la quantité (4.4) par l'action $r_{ijk}(t)$, nous obtenons la fraction de la charge actuelle en production du sous-module $mp(i, j, k)$. La charge totale à l'instant t sur le module $MP(i)$ s'obtient en cumulant les charges sur tous ses sous-modules $mp(i, j, k)$. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$U_i(t) = \sum_{\{j|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} r_{ijk}(t) A_{ijk} \quad (4.5)$$

Cette quantité représente le taux d'utilisation du module $MP(i)$. S'il est inférieur à 1, cela signifie qu'il reste de la capacité sur le module $MP(i)$. Cette dernière (capacité restante) est calculée comme suit :

$$CR_i(t) = 1 - U_i(t) \quad (4.6)$$

Dans ce cas, une redistribution de la capacité restante sur chaque module de production $MP(i)$ traduit une meilleure utilisation du module. Nous adoptons dans notre cas une approche qui consiste à allouer le maximum de capacité restante aux sous-modules dont la production est inférieure à la demande. Autrement dit, ceux pour lesquels le surplus local est négatif. Ainsi, toute la capacité restante est allouée aux sous-modules $mp(i, j, k)$ dont la commande globale $r_{ijk}(t)$ est égale à 1. Si cette condition est vérifiée pour plusieurs sous-modules, alors la capacité restante est distribuée de façon équitable sur ces derniers [Ioannidis et al., 2004].

Dans ce cas, en considérant la fonction binaire $\beta_{ijk}(t)$, telle que :

$$\beta_{ijk}(t) = \begin{cases} 0 & , \text{si } r_{ijk}(t) < 1 \\ 1 & , \text{si } r_{ijk}(t) = 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

la fraction de la capacité restante du module $MP(i)$ allouée aux sous-modules $mp(i, j, k)$ satisfaisant la fonction (4.7) est donnée par l'expression suivante :

$$C_{ijk}(t) = \frac{d_j \tau_{ijk} \beta_{ijk}(t)}{\sum_{\{j|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk} \beta_{ijk}(t)} \quad (4.8)$$

Cette relation est similaire à l'équation (4.4) à la différence qu'elle fait intervenir uniquement les sous-modules dont le facteur $r_{ijk}(t)$ associé est égal à 1. On déduit alors la fraction de la charge « en extra allouée » comme suit :

$$E_{ijk}(t) = CR_i(t) \cdot C_{ijk}(t) \quad (4.9)$$

Finalement le taux de production donné par l'équation (4.2) est reformulé comme suit :

$$u_{ijk}(t) = r_{ijk}(t) u_{ijk}^{\max} + E_{ijk}(t) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ijk}} \right) \quad (4.10)$$

Afin de définir à chaque instant le sous-module « activé », *i.e.*, le flux de produit sur lequel le module original va travailler, nous adoptons un critère qui consiste à choisir le flux de produit dont la performance du surplus local est la moins satisfaisante. Ceci revient à travailler sur le flux de produits qui accuse le plus de retard par rapport à la production demandée.

Dans le modèle de simulation, l'instant de chargement (loading time) des flux de produits est fixé selon la stratégie en escalier (« staircase strategy » [Gershwin, 1989]). Cette politique revient à faire un chargement à chaque fois que la production actuelle du flux est inférieure ou égale à l'intégrale de son taux de production (production théorique). Cette condition est appelée « règle d'éligibilité » des chargements des flux de produits sur un module de production.

2.2.3. Logique d'allocation de capacité en simulation

Nous résumons ici les étapes de la logique d'allocation de capacité sur un module de production $MP(i)$, exécutées en simulation à chaque instant t_n , avec un pas de discrétisation $\delta t_n = t_{n+1} - t_n$.

Début

Initialisation : $t_n \leftarrow 0$

Tant que $t_n \leq \text{Horizon_Simulation}$ **faire**

Pour i allant de 1 à N **faire**

Tant que $Q(i) \neq \emptyset$ **faire**

Sélectionner un type $j \in Q(i)$ de flux de produits

Pour k allant de 1 à K_{ij} **faire**

Calculer la commande globale $r_{ijk}(t_n)$

Si $0 < r_{ijk}(t_n) < 1$ **alors**

Calculer le taux de production $u_{ijk}(t_n)$ du sous-module $mp(i, j, k)$ selon (4.2)

Sinon

Si $r_{ijk}(t_n) = 1$ **alors**

Calculer la capacité restante suivant la relation (4.6)

Distribuer la capacité restante aux flux de produits prioritaires selon la relation (4.9)

Calculer le taux de production $u_{ijk}(t_n)$ du sous-module $mp(i, j, k)$ selon (4.10)

Sinon $u_{ijk}(t_n) = 0$

Fin si

Fin pour

Fin tant que

Fin tant que

Sélectionner le flux de produits pour lequel le surplus local négatif est maximal

Calculer l'instant de chargement du flux de produits suivant la stratégie en escalier

Fin pour

$t_n \leftarrow t_n + \delta t_n$

Fin tant que

Fin

2.2.4. Exemple d'illustration

Pour illustrer l'approche de pilotage dans le cas multi-produit, nous considérons un exemple simple d'une ligne de transformation homogène à trois machines produisant deux types de produits (Cf. Figure 4.2). Le routage de chaque type de flux est différencié sur la Figure 4.2.

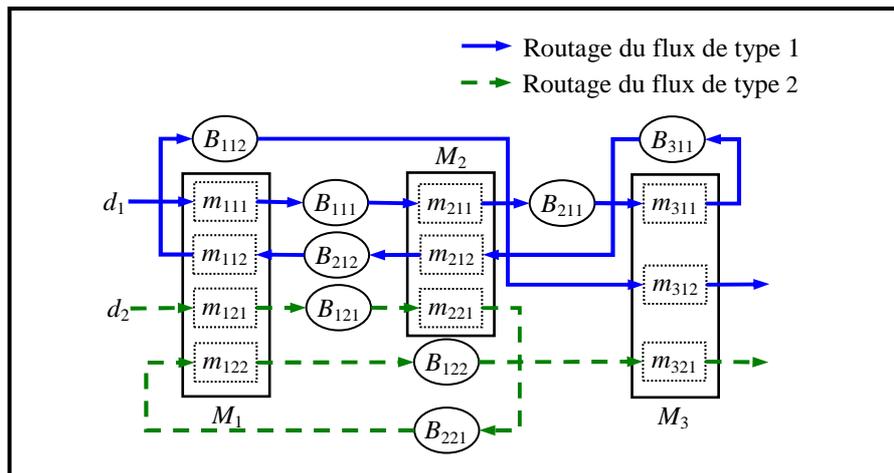


Figure 4.2 : Ligne de transformation à 3 machines, 2 types de produit.

A. Modèle continu du système

Pour chaque type de produit, le modèle de flux décrivant la dynamique de ce système est donné par les équations d'état suivantes :

Flux de production du type 1 :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1,1,1}(t) \\ \dot{x}_{1,1,2}(t) \\ \dot{x}_{2,1,1}(t) \\ \dot{x}_{2,1,2}(t) \\ \dot{x}_{3,1,1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1,1,1}(t) \\ u_{1,1,2}(t) \\ u_{2,1,1}(t) \\ u_{2,1,2}(t) \\ u_{3,1,1}(t) \\ u_{3,1,2}(t) \end{bmatrix} = B_1 u_1(t) \\ y_{3,1,2}(t) = \int_0^t u_{3,1,2}(v) dv \end{cases}$$

Flux de production du type 2 :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1,2,1}(t) \\ \dot{x}_{1,2,2}(t) \\ \dot{x}_{2,2,1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1,2,1}(t) \\ u_{1,2,2}(t) \\ u_{2,2,1}(t) \\ u_{3,2,1}(t) \end{bmatrix} = B_2 u_2(t) \\ y_{3,2,1}(t) = \int_0^t u_{3,2,1}(v) dv \end{cases}$$

Les paramètres du système sont donnés par :

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.5, & \mu_2 &= 0.5, & \mu_3 &= 0.5, \\ \lambda_1 &= 0.1, & \lambda_2 &= 0.1, & \lambda_3 &= 0.1, \\ \tau_{111} &= 0.1, & \tau_{211} &= 0.1, & \tau_{311} &= 0.1, \\ \tau_{112} &= 0.1, & \tau_{212} &= 0.1, & \tau_{312} &= 0.1, \\ \tau_{121} &= 0.1, & \tau_{221} &= 0.1, & \tau_{321} &= 0.1, \\ \tau_{122} &= 0.1, \end{aligned}$$

Pour les taux de demande : $d_1 = 2$ et $d_2 = 1.5$, la condition de faisabilité (2.35) reste vérifiée. En effet, la condition (2.35) pour chaque type de flux, donne dans ce cas :

$$0 < d_1 \leq 2.27 \text{ et } 0 < d_2 \leq 1.78$$

Le système dispose alors de suffisamment de capacité de production pour satisfaire toutes les demandes spécifiées. Aussi, de par la structure considérée, le système reste contrôlable.

B. Commande locale distribuée

Dans la décomposition « virtuelle » vue précédemment, les paramètres de chaque sous-module de contrôle flou $mc(i, j, k)$ (les univers de discours des entrées du contrôleur) sont estimés, pour chaque type de flux, à travers la procédure donnée dans le Chapitre 2. Nous résumons les paramètres obtenus dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Paramètres des modules de contrôle flous.

Machine (i)	Opération (k)	Niveau de sécurité du surplus		Paramètres de rupture / blocage des stocks				Capacité maximale des stocks	
		$z_{i,1,k}$	$z_{i,2,k}$	$z_{i,1,k}^r$	$z_{i,1,k}^b$	$z_{i,2,k}^r$	$z_{i,2,k}^b$	$x_{i,1,k}^{\max}$	$x_{i,2,k}^{\max}$
1	1	16.137	8.161	4	0.190	3	0	4	3
	2	0.137	2.161	0	4	0	3	4	3
2	1	12.137	5.161	4	4	3	3	8	6
	2	4.137	-	4	4	-	-	8	-
3	1	8.137	2.161	4	4	-	-	8	-
	2	0.137	-	-	-	-	-	-	-

A partir du Tableau 4.1, en effectuant la somme de toutes les valeurs des paramètres $z_{i,j,k}^r$ obtenues pour chaque type de produit, nous pouvons donner une estimation de l'encours

minimal requis pour une bonne régulation des flux. La borne maximale de l'encours peut quant à elle être approximée par la somme des capacités de tous les stocks intermédiaires $x_{i,j,k}^{\max}$ en négligeant les flux de produits en cours de traitement. Nous pouvons alors écrire :

$$\sum_{\{i|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} z_{i,j,k}^r \leq \text{WIP}_j(t_n) \leq \sum_{\{i|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} x_{i,j,k}^{\max} \quad (4.11)$$

C'est-à-dire :

$$16 \leq \text{WIP}_1(t_n) \leq 32 \text{ et } 6 \leq \text{WIP}_2(t_n) \leq 12$$

Les performances de la commande locale sont évaluées par simulation en fixant le pas de discrétisation à $\delta t_n = 0.1$ unités de temps. Les résultats sont donnés par la moyenne sur 10 répliques de 10000 unités de temps chacune (horizon de simulation).

La Figure 4.3 illustre les performances du surplus final, sa tendance moyenne et l'encours instantané pour chaque type de produit.

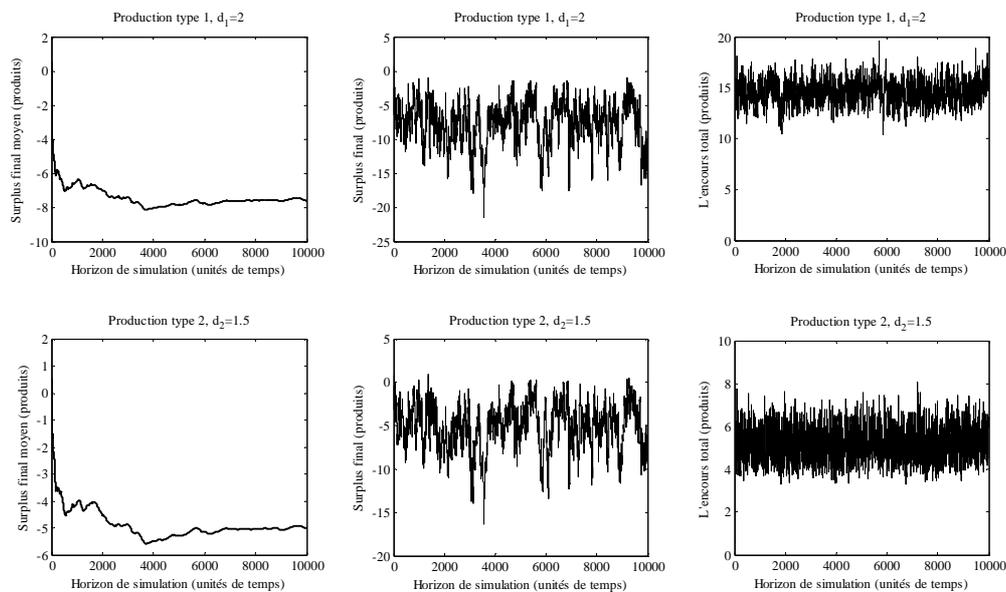


Figure 4.3 : Performances en production de chaque type de produit.

La Figure 4.4 et la Figure 4.5 représentent respectivement le retard moyen de la production par rapport à la demande ainsi que la tendance moyenne de l'encours pour chaque type de produit.

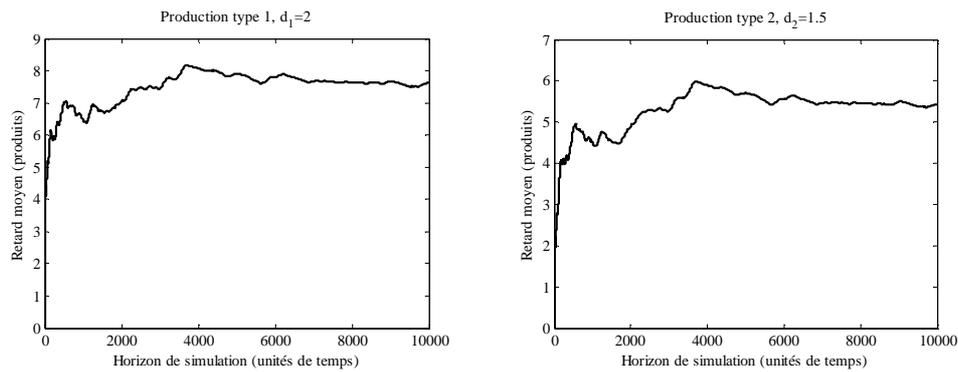


Figure 4.4 : Retard moyen pour chaque type de produit.

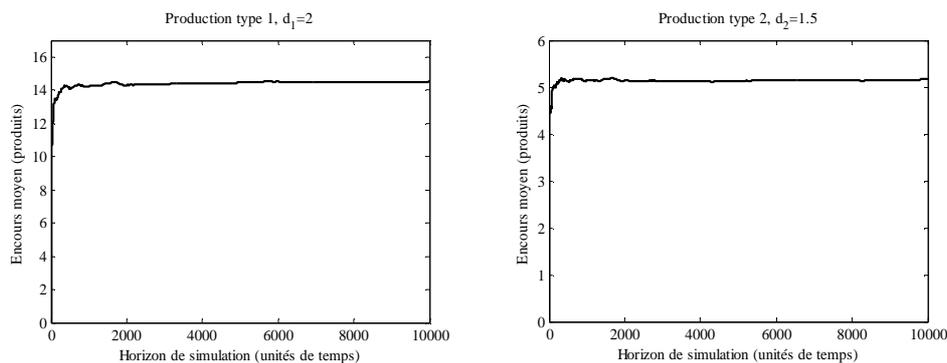


Figure 4.5 : L'encours moyen pour chaque type de produit.

En observant l'indicateur du surplus final (Cf. Figure 4.3 et Figure 4.4), nous constatons des retards sur les demandes désirées. La performance de l'encours obtenue pour chaque type de produit reste légèrement au dessous des seuils minimaux nécessaires (Cf. Figure 4.5). Ces performances s'expliquent par les approximations considérées dans le calcul des paramètres des contrôleurs locaux et les fortes demandes injectées (proches de la capacité maximale du système). Dans le but d'améliorer ces performances et plus particulièrement celles liées au surplus final, nous introduisons la supervision dans le système de pilotage.

C. Supervision

Dans la conception du superviseur, nous considérons un certain nombre d'indicateurs de performance afin de satisfaire les objectifs globaux spécifiés, le but étant d'améliorer les performances de suivi de demande (un surplus final proche de zéro) tout en maintenant un encours minimal pour une bonne synchronisation des opérations. En ce sens, nous considérons les trois indicateurs suivants : le surplus final P_{j2} , sa tendance moyenne P_{j1} et l'encours P_{j3} ($j = 1, 2$).

Sur la base des performances de la commande locale, il apparaît clairement que l'indicateur le moins satisfaisant est celui du surplus. Dans ce cas, une préférence est donnée à l'amélioration de cette performance, c'est-à-dire, réduire les retards sur les demandes. Comme ces derniers sont en opposition avec l'encours, le mécanisme de supervision adopté doit alors être capable de réaliser un compromis satisfaisant entre les performances. C'est la raison pour laquelle nous utilisons le principe de supervision par agrégation des objectifs en adoptant l'opérateur de la somme pondérée. Dans ce cas, les intervalles flous des objectifs P_{jl}^{obj} sont illustrés sur la Figure 4.6.

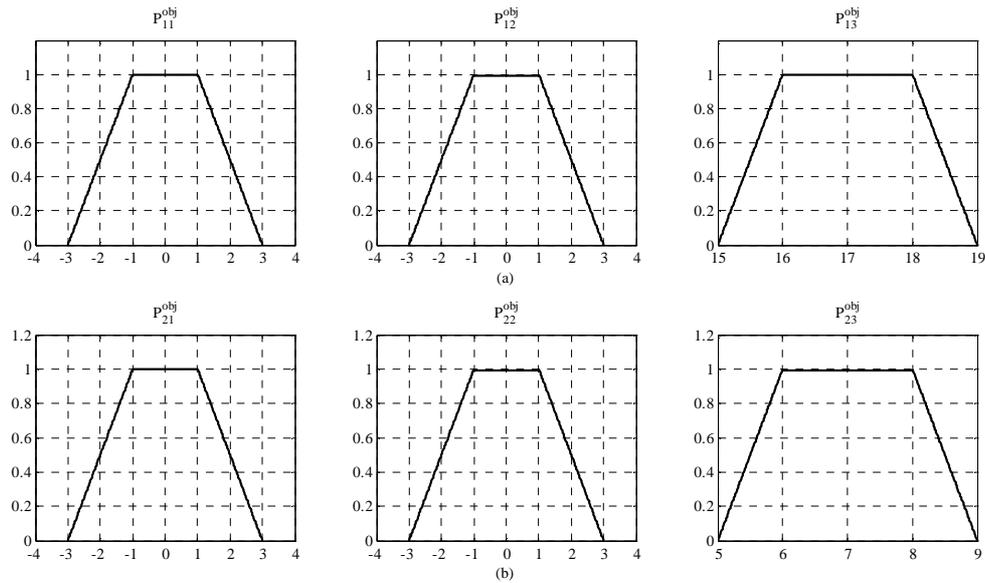


Figure 4.6 : Les intervalles flous des objectifs de production du : (a) type 1, (b) type 2.

Les poids associés à la somme pondérée sont fixés pour chaque type de produit comme suit : $w_{j1} = 0.4$, $w_{j2} = 0.4$ et $w_{j3} = 0.2$.

La Figure 4.7 illustre, pour chaque type de produit, l'évolution des trois indicateurs de performance.

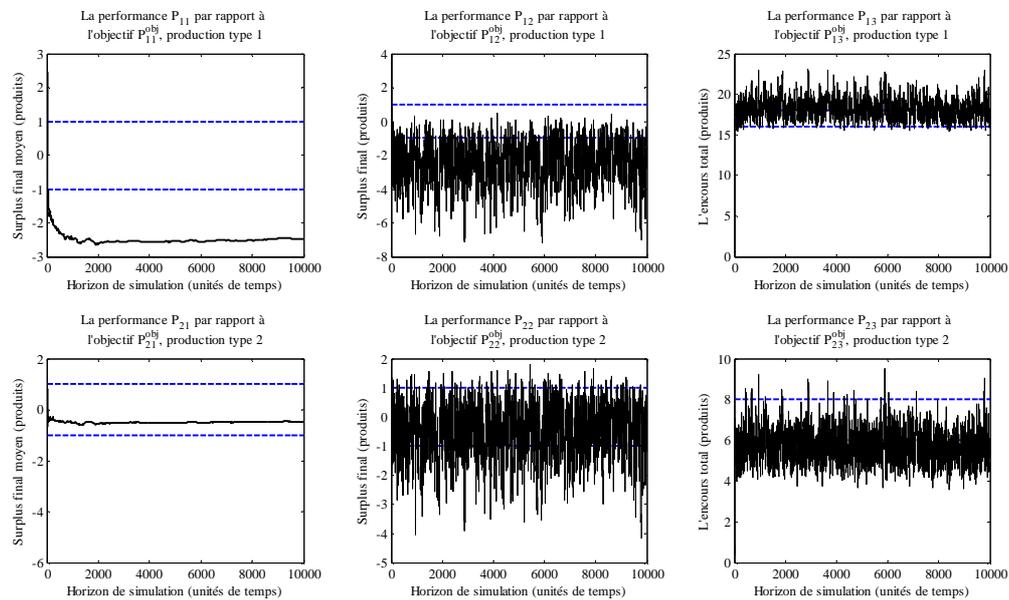


Figure 4.7 : Performances du pilotage supervisé via le mécanisme d'agrégation des objectifs.

La Figure 4.8 et la Figure 4.9 comparent respectivement les tendances moyennes du retard et de l'encours dans le cas d'un pilotage non supervisé et supervisé.

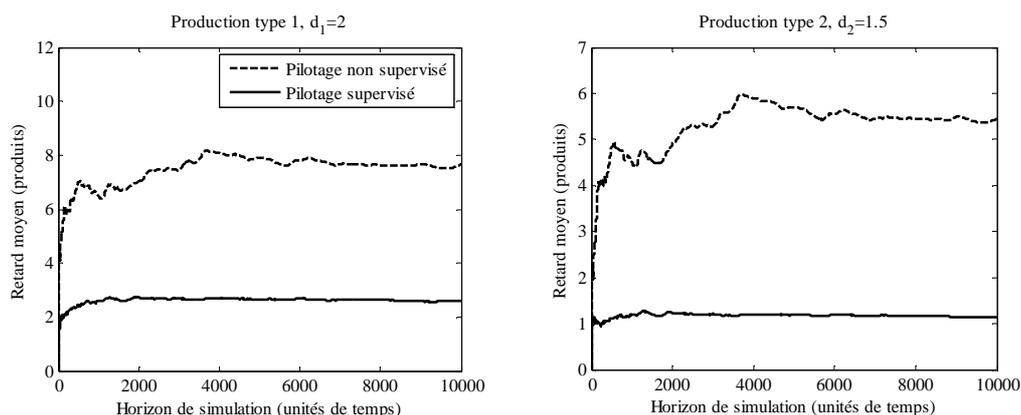


Figure 4.8 : Retard moyen pour chaque type de produit.

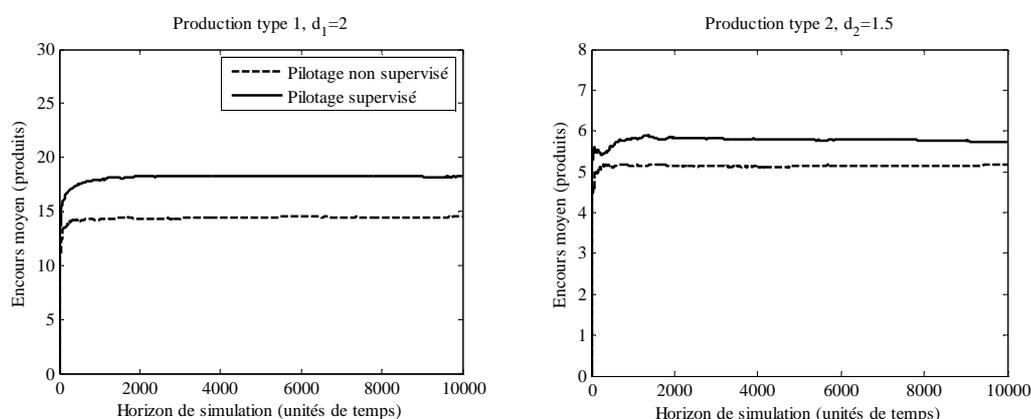


Figure 4.9 : L'encours moyen pour chaque type de produit.

Le Tableau 4.2 donne les significations statistiques des résultats de simulation obtenus sur les 10 répliques. Le niveau de confiance est calculé à partir de la loi de Student et correspond à l'intervalle de confiance contenant les 10 échantillons de moyenne et d'écart type estimés.

Tableau 4.2 : Estimation statistique des résultats de simulation.

Taux de demande (Produits/u.t.)		Pilotage distribué non supervisé		Pilotage supervisé par agrégation des objectifs	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
$d_1 = 0.2$	Moyenne	14.506	7.641	18.210	2.589
	Ecart type	0.255	0.786	0.254	0.149
	Maximum	14.894	8.704	18.470	2.744
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99
$d_2 = 1.5$	Moyenne	5.167	5.435	5.734	1.147
	Ecart type	0.078	0.640	0.093	0.077
	Maximum	5.325	6.200	5.877	1.238
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99

En guise de conclusion sur cet exemple, on peut dire que sous l'action du superviseur, nous constatons une nette réduction des retards de plus de 66% pour la production du type 1 (bien que la performance du surplus dans ce cas évolue en dehors de son intervalle de tolérance, Cf. Figure 4.7) et de plus de 78% pour la production du type 2 (Cf. Figure 4.8, Tableau 4.2).

Néanmoins, cette tendance est obtenue au prix d'une augmentation du niveau des encours de 20% pour le type 1 et de 9% pour le type 2 (Cf. Figure 4.9, Tableau 4.2). Ainsi, à travers les performances obtenues par supervision, on montre l'effet de compensation entre l'encours et le surplus qui se répercute au niveau de la moyenne des retards.

3. Cas d'applications

L'objectif de cette partie est d'illustrer la faisabilité et la robustesse de l'approche de pilotage proposée sur deux cas d'application. Le premier, tiré de la littérature, est un cas de système multi-produits comportant des opérations de transformation, d'assemblage et de désassemblage avec des phases de production cycliques [Ioannidis et al., 2004 ; Tamani et al., 2007b, 2008a]. Le deuxième exemple est une application dans l'industrie des semi-conducteurs qui présente un cas réel d'un système de production à forte densité de produits [Tamani et al., 2008b]. Le même protocole de simulation sera adopté à chacun des cas traités à savoir :

- Les demandes sont faisables et la contrôlabilité du système est vérifiée.
- Les performances sont illustrées pour la commande locale (sans supervision) et pour le pilotage avec supervision.
- Les résultats de simulation sont donnés en moyenne sur 10 répliques de durée spécifiée en unités de temps selon le cas traité.
- Le pas de discrétisation est fixé selon le temps opératoire le plus court.

3.1. Application 1 : système multi-produit à phases cycliques

L'intérêt de cet exemple est de montrer, d'une part, la faisabilité de l'approche proposée en présence d'opérations diverses et de phénomènes aléatoires (pannes, demande fluctuante selon la loi de Poisson) et d'autre part, la comparaison des résultats de notre approche avec ceux obtenus par la méthode donnée dans [Ioannidis et al., 2004].

3.1.1. Configuration du système

Nous conservons ici la configuration du système donnée dans [Ioannidis et al., 2004], à savoir :

Le système est composé de 7 modules de production interconnectés par 24 stocks intermédiaires de capacités finies (fixées à 10). Dans ce cas, la méthode utilisée dans le Chapitre 2 pour fixer les paramètres des contrôleurs locaux ne s'applique pas directement sur des séquences d'assemblage et de désassemblage. Les paramètres donnés dans [Ioannidis et al., 2004] sont alors utilisés. Le système fabrique 3 types de produits dont les séquences d'opérations respectives sont illustrées sur la Figure 4.10.

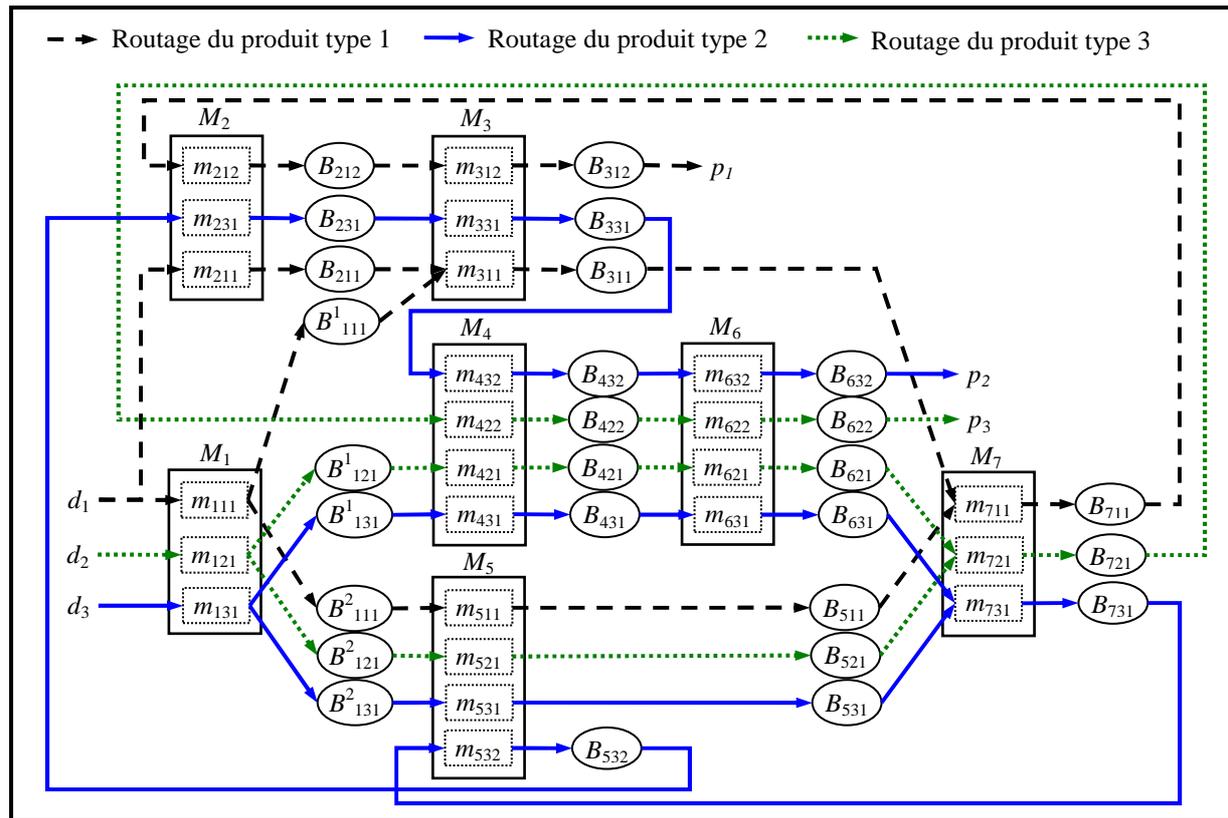


Figure 4.10 : Système de production multi-produit à flux cycliques [Ioannidis et al., 2004].

Chaque module de production multi-produit est décomposé « virtuellement » en sous-modules mono-produits (désignés en pointillés sur la Figure 4.10). Les temps opératoires sur chaque sous-module sont donnés dans le Tableau 4.3. Les taux de panne et de réparation sont fixés respectivement à $\lambda_i = 0.1$ et $\mu_i = 0.5$ pour $i = 1, \dots, 7$.

Tableau 4.3 : Temps opératoires τ_{ijk} par opération et par type de produit.

Produit de type (j)	Opération (k)	Machine (i)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	1	0.2	0.2	0.2	-	0.15	-	0.2
	2	-	0.15	0.15	-	-	-	-
2	1	0.2	-	-	0.15	0.15	0.15	0.2
	2	-	-	-	0.15	-	0.15	-
3	1	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.15	0.2
	2	-	-	-	0.15	0.15	0.15	-

3.1.2. Indicateurs de performance

Afin d'évaluer les performances de notre l'approche, nous comparons les résultats obtenus à ceux de la technique développée dans [Ioannidis et al., 2004] qui est proche de la problématique que nous traitons. Pour cela, nous donnons les principes prépondérants régissant leur méthode, qui a été brièvement évoquée lors de l'analyse bibliographique des approches de supervision existantes (Cf. Chapitre 3, §2.1).

En effet, la structure de pilotage proposée par Ioannidis et al. [Ioannidis et al., 2004] est organisée en deux niveaux hiérarchiques : un niveau « commande locale » distribuée et un niveau « supervision ». Au niveau commande locale, développée initialement dans [Tsourveloudis et al., 2000], les auteurs utilisent un système flou de Mamdani à conclusion

symbolique pour synthétiser un contrôleur sur chaque ressource de production dans le but de réguler les différents flux de production circulant dans le système. La structure locale a été augmentée d'un niveau de supervision dont l'action consiste à modifier la structure du contrôleur local afin de piloter les lancements en production. L'objectif est d'améliorer les performances globales du système en termes d'encours, de temps de production et de qualité de service.

Dans la synthèse du superviseur, les auteurs utilisent un système flou et considèrent le surplus final comme principale information du système global dont le domaine de fonctionnement admissible n'est pas défini a priori. Ils proposent alors d'adapter les bornes de fonctionnement admissible du surplus par un ensemble de règles floues élaborées selon l'expertise suivante :

- Si la borne supérieure du domaine de fonctionnement admissible du surplus est réduite, il y a réduction immédiate du niveau des encours.
- Si la borne supérieure du surplus est augmentée, cela implique une augmentation du niveau des encours et de la production finale (throughput) et une légère réduction du retard total (backlog).
- Si la borne inférieure du surplus est augmentée, une réduction substantielle du retard total est atteinte au prix d'un niveau d'encours plus élevé.
- Si la borne inférieure du surplus est réduite, cela induit une augmentation du retard total et une diminution des encours.

L'action du superviseur est alors appliquée au niveau bas de l'architecture de pilotage afin d'adapter l'univers de discours de l'entrée du surplus sur chaque contrôleur local. Etant donné que les lancements de production sont définis sur les ressources d'entrées du système (première machine de la gamme de production), les actions du superviseur les plus significatives sont alors établies à ce niveau. Ainsi, les auteurs ont fait le constat qu'en adaptant les bornes de fonctionnement admissible du surplus des premières machines de la gamme de production, cela revient à contrôler les lancements de produits dans le système [Wein, 1988 ; Ioannidis et al., 2004 ; Ioannidis and Tsourveloudis, 2006].

Les variables d'entrée du superviseur, traduisant les indicateurs du surplus final et de l'encours pour chaque type de flux de produits ($j = 1, 2$), sont :

- P_{j1} : le surplus final moyen,
- P_{j2} : le surplus final instantané,
- P_{j3} : l'erreur relative de l'encours *WIP* (*Work-In-Process*), donnée par :

$$P_{j3}(t_n) = e_{WIP_j}(t_n) = \frac{WIP_j(t_n) - \overline{WIP}_j(t_n)}{\overline{WIP}_j(t_n)} \quad (4.12)$$

où :

$$WIP_j(t_n) = \sum_{\{i|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} [x_{ijk}(t_n) + u_{ijk}(t_n) \delta_n] \quad (4.13)$$

et

$$\overline{WIP}_j(t_n) = \frac{1}{t_n} \sum_{l=1}^n WIP_j(t_l) \delta_l \quad (4.14)$$

est le niveau d'encours moyen au cours du temps jusqu'à l'instant t_n .

Les auteurs justifient l'utilisation de l'erreur relative comme mesure de la performance de l'encours global par le fait qu'il est difficile d'obtenir une estimation de l'encours minimal. Le choix de ce critère dans ce cas est basé sur le constat que l'encours nécessaire pour une bonne synchronisation des opérations dans un système de production est approximativement égal à sa moyenne. Enfin, la base de règles complète du superviseur flou est fournie dans [Ioannidis et al., 2004].

Dans les tests de simulation, les objectifs de production suivants sont considérés :

- maintenir un encours stable minimal par type de produit,
- réduire au maximum les retards de la production par rapport aux différentes demandes,
- assurer un bon suivi de trajectoire, et donc un surplus final borné.

Ces différents objectifs, établis pour chaque type de produit, sont évalués par les trois indicateurs de performance définis pour la supervision. En effet, maintenir les indicateurs P_{j2} et P_{j1} bornées traduit un retard réduit (surplus négatif) et un faible excédent (surplus positif) ce qui permet d'atteindre un bon suivi de production à des coûts minimaux. L'indicateur P_{j3} permet d'assurer un encours stable en évitant de large déviation par rapport à sa moyenne.

Dans la méthode proposée, nous comparons deux mécanismes de supervision à savoir :

- le mécanisme d'agrégation des actions avec représentation des objectifs à base d'intervalles conventionnels,
- le mécanisme d'agrégation des objectifs avec représentation à base d'intervalles flous.

Pour le cas d'agrégation des actions, les poids sont fixés dynamiquement en fonction des degrés d'éloignement des mesures des indicateurs par rapport aux bornes de leurs intervalles de tolérance. Pour le cas de l'agrégation des indicateurs de performance et des objectifs, les poids sont tous choisis identiques (moyenne arithmétique).

Les intervalles de tolérance utilisés dans le cas d'agrégation des actions sont :

$$P_{j1}^{\text{obj}} = [-1, +1] ; P_{j2}^{\text{obj}} = [-1, +1] ; P_{j3}^{\text{obj}} = [-0.5, +0.5]$$

Conformément au partitionnement des univers de discours des entrées du système flou utilisé dans [Ioannidis et al., 2004], les intervalles flous P_{jl}^{obj} considérés dans l'agrégation des objectifs sont fixés comme illustrés sur la Figure 4.11.

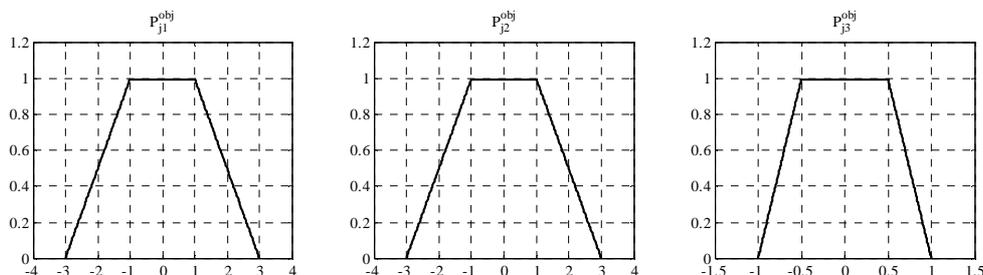


Figure 4.11 : Les intervalles flous des objectifs de chaque type de produit.

Pour la configuration du système (temps opératoires et paramètres de fiabilité des machines), la condition de faisabilité des demandes (2.35) s'exprime pour chaque type de produit comme suit :

$$0 < d_j \leq 1.38, \text{ pour } j = 1, 2, 3.$$

3.1.3. Tests et résultats des simulations

Dans les simulations, deux types de trajectoire de demandes sont étudiés :

- Le cas où la trajectoire de la demande est linéaire dans le temps, *i.e.*, suivant un taux constant.
- Le cas où la trajectoire de la demande est fluctuante autour d'une moyenne constante suivant une distribution de Poisson (*i.e.*, à chaque pas de discrétisation, pour une probabilité tirée de manière aléatoire, le nombre entier généré par la loi de Poisson de taux fixe est intégré dans le temps).

Nous comparons les résultats obtenus via les stratégies suivantes :

- Approche d'allocation de capacité distribuée floue sans supervision, nommée « Approche 1 ».
- Approche de supervision développée dans [Ioannidis et al., 2004], dénotée « Approche 2 ».
- Approche d'allocation de capacité supervisée selon le mécanisme d'agrégation des actions, notée « Approche 3 », avec représentation des objectifs par des intervalles conventionnels [Tamani et al., 2007b, 2008a].
- Approche d'allocation de capacité supervisée selon le mécanisme d'agrégation des objectifs, notée « Approche 4 », avec représentation par des intervalles flous.

Le Tableau 4.4, le Tableau 4.5 et le Tableau 4.6 résument, respectivement pour chaque type de produit, les résultats obtenus via les différentes approches appliquées en termes d'encours moyen et de retard moyen pour les deux types de trajectoires de demande et en fonction de différent taux.

Tableau 4.4 : Résultats de la production du type 1 pour différents scénarios.

Taux de demande (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	0.7	13.278	1.584	13.190	0.977	13.195	1.119	13.069	1.316
	0.8	15.409	2.882	15.014	1.277	13.576	1.316	14.012	1.809
	0.9	18.511	4.479	17.096	1.677	14.179	1.644	15.511	2.198
	1	21.049	6.934	20.201	3.831	16.301	2.925	17.573	2.531
	1.1	24.877	11.229	25.331	8.323	20.639	5.803	20.629	2.788
Aléatoire	0.7	13.377	1.699	13.362	1.070	13.048	1.028	13.182	1.381
	0.8	15.529	2.949	15.047	1.365	13.584	1.319	14.103	1.827
	0.9	18.769	4.699	17.299	1.824	14.400	1.818	15.320	2.226
	1	21.288	7.071	20.308	4.146	16.670	3.378	17.445	2.570
	1.1	25.508	12.439	25.505	9.352	21.455	6.561	20.692	2.906

Tableau 4.5 : Résultats de la production du type 2 pour différents scénarios.

Taux de demande (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	0.7	14.721	2.664	13.189	1.091	11.948	1.219	12.093	1.741
	0.8	16.606	4.286	15.958	1.464	12.141	1.396	12.835	2.110
	0.9	19.343	6.165	17.941	3.093	13.373	2.182	14.249	2.471
	1	22.882	9.380	21.133	6.445	15.906	3.996	16.763	2.838
	1.1	29.050	17.317	26.465	13.946	21.138	8.424	21.518	3.049
Aléatoire	0.7	13.353	2.657	12.908	1.204	11.708	1.227	12.081	1.740
	0.8	15.872	4.207	14.756	1.590	12.241	1.480	12.970	2.119
	0.9	18.032	6.482	17.380	3.191	13.619	2.416	14.897	2.475
	1	21.952	9.812	20.994	6.673	16.297	4.528	16.974	2.837
	1.1	26.534	19.300	26.455	14.651	21.727	9.488	22.271	3.235

Tableau 4.6 : Résultats de la production du type 3 pour différents scénarios.

Taux de demande (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	0.7	19.321	6.941	17.808	3.188	11.330	1.638	12.876	2.210
	0.8	22.256	9.437	20.680	5.932	13.194	3.043	14.173	2.457
	0.9	26.390	12.371	23.962	9.208	16.395	5.476	16.814	2.707
	1	31.741	17.207	28.931	14.216	21.056	9.247	21.440	2.957
	1.1	40.793	28.071	37.202	25.967	28.956	16.213	31.110	3.036
Aléatoire	0.7	17.891	6.881	17.137	3.250	11.611	1.859	12.900	2.208
	0.8	20.625	9.361	19.928	5.910	13.576	3.308	14.509	2.467
	0.9	23.601	12.685	22.941	9.241	16.786	5.791	17.936	2.706
	1	28.898	17.673	28.607	14.271	21.402	9.675	21.501	2.943
	1.1	37.277	31.036	36.611	24.864	29.815	17.482	30.843	3.268

La Figure 4.12 compare les performances des différentes approches en terme d'encours pour chaque type de produit en fonction des taux de demande.

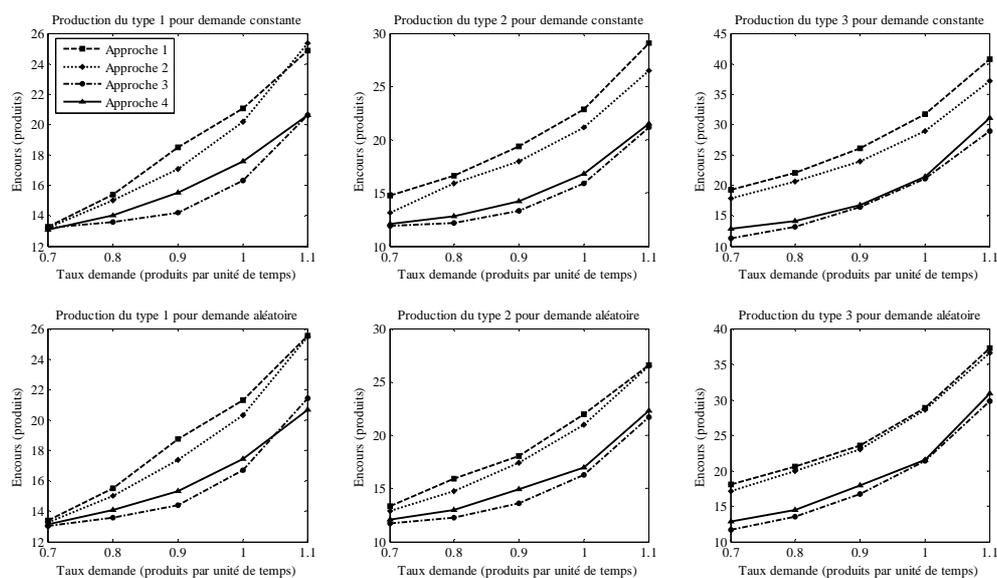


Figure 4.12 : L'encours moyen des différents types de produits en fonction des demandes.

La Figure 4.13 donne le retard total moyen pour chaque scénario de production pour chaque type de produit.

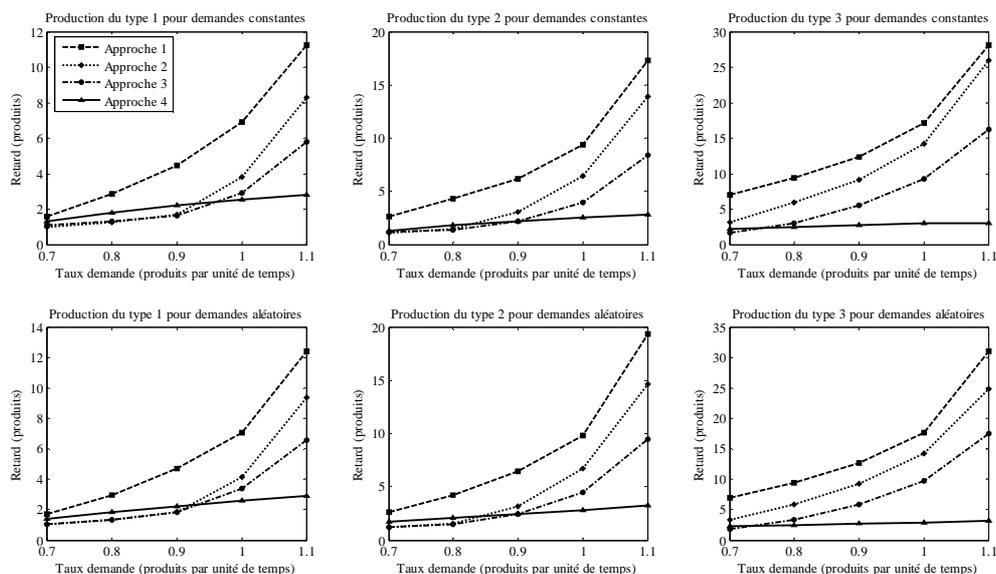


Figure 4.13 : Retard total moyen des différents type de produits en fonction des demandes.

Afin de donner une idée sur le degré de signification des résultats obtenus à travers les 10 répliquions de simulation, particulièrement le niveau de confiance associé aux valeurs mesurées des indicateurs, nous résumons respectivement sur le Tableau 4.7, le Tableau 4.8 et le Tableau 4.9, les estimations statistiques pour chaque type de produit dans le cas où le taux de demande est fixé à 1.1 produits par unité de temps (p/u.t.), *i.e.*, proche de la capacité maximale du système.

Tableau 4.7 : Estimation statistique des résultats de simulation de la production du type 1 pour $d = 1.1$ (p/u.t.).

Taux de demande $d=1.1$ (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	Maximum	25.313	11.710	25.765	9.351	21.571	6.541	21.667	2.987
	Ecart type	0.419	0.453	0.410	0.649	0.697	0.573	0.610	0.369
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.95	0.95
Aléatoire	Maximum	26.330	13.795	26.605	11.319	22.647	7.591	22.189	3.029
	Ecart type	0.648	0.875	0.845	1.436	0.782	0.694	1.254	0.082
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99	0.975	0.975	0.99	0.99

Tableau 4.8 : Estimation statistique des résultats de simulation de la production du type 2 pour $d = 1.1$ (p/u.t.).

Taux de demande $d=1.1$ (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	Maximum	30.848	18.748	27.367	14.682	23.256	10.293	22.576	3.305
	Ecart type	0.902	1.173	0.581	0.792	1.139	1.128	1.202	0.472
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Aléatoire	Maximum	27.620	21.646	26.950	16.682	22.368	10.743	24.184	3.354
	Ecart type	0.982	2.493	0.610	1.554	0.531	0.870	1.924	0.084
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.975	0.99	0.99	0.95	0.99	0.99

Tableau 4.9 : Estimation statistique des résultats de simulation de la production du type 3 pour $d = 1.1$ (p/u.t.).

Taux de demande $d=1.1$ (Produits/u.t.)		Approche 1		Approche 2		Approche 3		Approche 4	
		Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)	Encours (produits)	Retard (produits)
Constant	Maximum	42.467	29.777	37.797	28.196	31.605	18.601	32.949	3.278
	Ecart type	1.06	1.607	0.729	2.237	1.296	1.236	1.685	0.475
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Aléatoire	Maximum	38.937	35.279	38.015	27.605	30.847	18.498	33.644	3.351
	Ecart type	1.589	3.999	1.256	2.430	0.855	0.907	2.609	0.075
	Niveau de confiance	0.99	0.99	0.99	0.99	0.975	0.99	0.99	0.99

La Figure 4.14 illustre l'évolution de l'encours moyen au cours du temps pour les deux cas où la demande est constante et fluctuante suivant une distribution de Poisson.

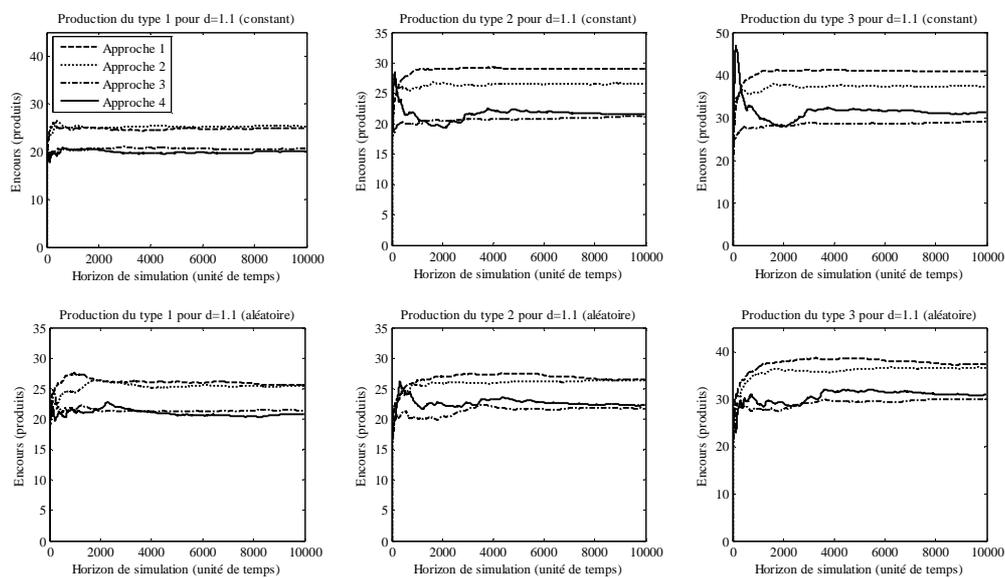
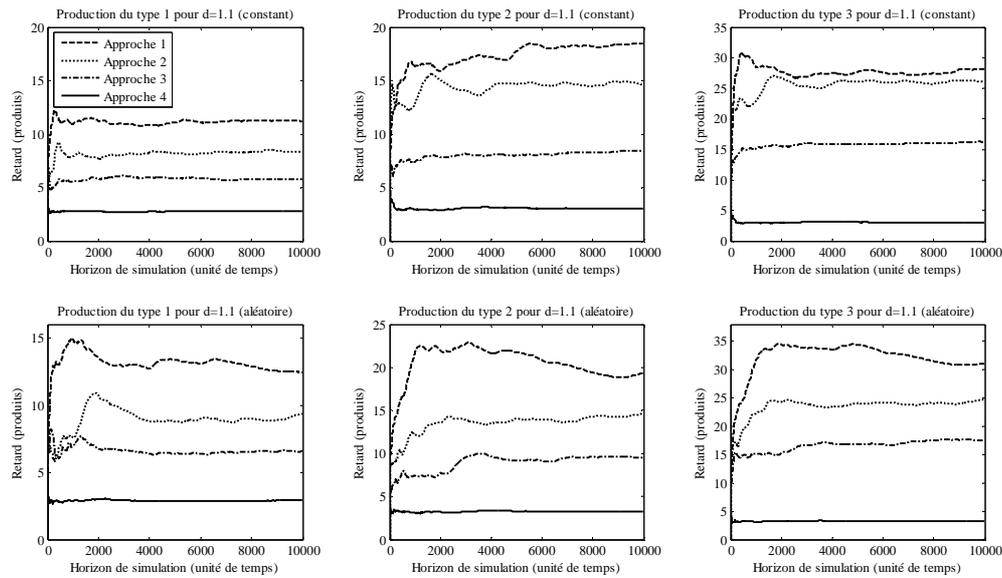


Figure 4.14 : Encours moyen pour $d = 1.1$ (p/u.t.).

La Figure 4.15 donne la tendance moyenne du retard pour les deux cas où la demande est constante ($d = 1.1$ p/u.t.) et lorsque elle évolue selon une distribution de Poisson de taux 1.1.

Figure 4.15 : Retard moyen pour $d = 1.1$ (p/u.t.).

3.1.4. Discussion

A travers le comparatif entre les différentes approches testées, on peut déduire que :

- Les approches supervisées atteignent des performances meilleures que celles obtenues par l'approche distribuée, particulièrement lorsque la charge du système est élevée (Cf. Figure 4.14 et Figure 4.15).
- L'approche de supervision par allocation de capacité régule plus efficacement les flux de produits comparée à la supervision agissant uniquement sur les lancements développée dans [Ioannidis et al., 2004].
- Le mécanisme de supervision par agrégation des objectifs (par intervalles flous) donne des résultats meilleurs, plus stables en terme de surplus comparés à ceux obtenus par agrégation des actions (par intervalles conventionnels) tandis que les performances de l'encours sont relativement proches (Cf. Tableau 4.7, Tableau 4.8 et Tableau 4.9).
- Les différentes approches testées restent robustes vis-à-vis de phénomènes aléatoires tels que les pannes et la fluctuation des demandes (demandes aléatoires).

Ces différentes constatations appuient les résultats obtenus sur les systèmes simples traités précédemment. En effet, bien que la dimension du système étudié soit plus importante et la densité ainsi que la variété des flux soient plus élevées, l'approche de pilotage que nous avons développée reste faisable.

Les deux mécanismes d'agrégation utilisés sont équivalents du fait qu'aucune préférence n'est donnée aux différents indicateurs de performance. Néanmoins, le fait d'adoucir les commutations de la loi de supervision en adoptant une représentation par intervalles flous contribue à l'amélioration des performances de la commande globale, particulièrement vis-à-vis des retards sur la production désirée. Par ailleurs, la supervision par allocation de capacité tient compte de la dynamique interne des flux, ce qui a permis d'agir plus efficacement sur les ressources critiques pour la synchronisation des opérations.

3.2. Application 2 : système à semi-conducteurs

Le deuxième exemple que nous considérons est une application dans l'industrie des semi-conducteurs [Bai, 1991 ; Tamani et al., 2008b]. En effet, l'environnement de production automatisé requis pour produire les semi-conducteurs compte parmi les plus complexes et les plus coûteux, ce qui a motivé de nombreux travaux en pilotage et simulation de flux [Wein, 1988 ; Vargas-Villamil et al., 2003 ; Wang et al., 2007]. Le processus implique plusieurs centaines d'étapes de traitement totalement automatisées sur de nombreux composants (des puces) regroupés généralement par lot (qui est l'unité des produits dans ce cas) et constituant ainsi un flux de produits pouvant être appréhendé comme un fluide.

3.2.1. Configuration du système

Le système considéré est constitué de 10 machines et comporte deux processus de fabrication. Le premier processus est une séquence de 17 opérations de transformation avec des séquences cycliques au niveau des machines M_1, M_7, M_8, M_9 et M_{10} . Le deuxième processus est une séquence linéaire de 7 opérations de transformation. Il y a autant de stocks intermédiaires que d'opérations. Les temps opératoires de chaque processus sont donnés dans le Tableau 4.10. L'unité de temps considérée est l'heure.

Tableau 4.10 : Temps opératoires τ_{ijk} des machines pour les deux processus (heures).

Processus (j)	Opération (k)	Machine (i)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Processus 1 : $d_1 = 0.6$ (lots/heure)	1	0.25	0.469	0.969	0.469	0.469	0.25	0.156	0.188	0.131	0.469
	2	0.25	-	-	-	-	-	0.156	0.188	0.131	0.469
	3	-	-	-	-	-	-	-	0.188	0.163	-
Processus 2 : $d_2 = 0.5$ (lots/heure)	1	0.25	-	0.656	0.469	0.469	-	0.156	-	0.163	0.469

Les taux de panne et de réparation des différentes machines sont spécifiés dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Taux de panne et de réparation des différentes machines (1/heure).

	Machine (i)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_i	0.01	0.001	0.002	0.002	0.017	0.002	0.002	0.01	0.001	0.01
μ_i	0.5	0.5	0.5	0.5	0.33	0.5	0.33	0.5	0.5	0.33

Les paramètres de chaque sous-module de contrôle flou $mc(i, j, k)$ (les univers de discours des entrées du contrôleur) sont fournis dans le Tableau 4.12 pour le processus 1 et dans le Tableau 4.13 pour le processus 2.

Tableau 4.12 : Paramètres des modules de contrôle flous pour le processus 1.

		Machine (i)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Niveau de sécurité du surplus	$z_{i,1,1}$	6.307	3.907	6.307	2.088	5.107	0.888	3.907	3.907	5.107	5.107
	$z_{i,1,2}$	5.107	-	-	-	-	-	0.888	2.088	2.088	0.888
	$z_{i,1,3}$	-	-	-	-	-	-	-	0.888	0.888	-
Paramètres de rupture / blocage	$z_{i,1,1}^r$	0	0	1.2	1.2	0	-	1.818	0	0	0
	$z_{i,1,2}^r$	1.2	-	-	-	-	-	0	0	0	0
	$z_{i,1,3}^r$	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-
	$z_{i,1,1}^b$	1.2	1.2	3.530	1.818	1.2	-	0	1.2	3.530	1.818
	$z_{i,1,2}^b$	0	-	-	-	-	-	1.818	1.2	1.2	1.818
	$z_{i,1,3}^b$	-	-	-	-	-	-	-	1.818	1.818	-
Capacité maximale des stocks	$x_{i,1,1}^{\max}$	1	1	5	3	1	-	2	1	4	2
	$x_{i,1,2}^{\max}$	1	-	-	-	-	-	2	1	1	2
	$x_{i,1,3}^{\max}$	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-

Tableau 4.13 : Paramètres des modules de contrôle flous pour le processus 2.

		Machine (i)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$z_{i,2,1}$	4.315	-	3.115	1.915	1.915	-	0.715	-	0.715	0.715
	$z_{i,2,1}^r$	1.2	-	1.2	1.2	0	-	-	-	0	0
	$z_{i,2,1}^b$	0	-	3.530	0	1.2	-	-	-	1.818	1.818
	$x_{i,2,1}^{\max}$	1	-	5	1	1	-	-	-	2	2

3.2.2. Les indicateurs de performance

Les indicateurs de performance utilisés en supervision sont : le surplus final (P_{j1}), l'encours (P_{j2}) et le temps de production (P_{j3}). A partir de la relation (4.11) et les paramètres des contrôleurs locaux fournis dans le Tableau 4.12 et le Tableau 4.13, nous avons :

$$5 \leq \text{WIP}_1(t_n) \leq 31 \text{ et } 3 \leq \text{WIP}_2(t_n) \leq 12$$

La tendance moyenne de l'indicateur du temps de production P_{j3} est calculée comme suit :

$$\bar{T}_j = \sum_{\{j|j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} \left[\frac{\bar{x}_{ijk}}{d_j} + \tau_{ijk} \right] \tag{4.15}$$

En effet, le flux de produits de type j traverse le système avec un taux moyen égal à celui de sa demande d_j . Le temps de production moyen est alors évalué à partir du temps moyen cumulé passé en attente dans les stocks intermédiaires (premier terme de l'expression (4.15)) et en traitement sur les modules de production (temps opératoires : deuxième terme de (4.15)).

Le temps de production et l'encours traduisent le même aspect de la performance : la fluidité des flux [Ait Hssain, 2000] (Cf. Chapitre 3, §3.1). La formule de Little suivante [Little, 1961] :

$$\overline{\text{WIP}}_j = d_j \cdot \bar{T}_j \tag{4.16}$$

exprime le fait que leurs valeurs moyennes sont proportionnelles. Il suffit alors d'en améliorer un des deux.

En se référant à la relation (4.16), et pour des taux de demande $d_1 = 0.6$ et $d_2 = 0.5$ lots/heure, nous pouvons donner une approximation du domaine d'évolution admissible de la performance du temps de production. Soit :

$$8.34 \leq T_1 \leq 51.67 \text{ et } 6 \leq T_2 \leq 24$$

Contrairement au cas précédent où les indicateurs de performance ne présentent pas de contradiction, dans la présente application ils sont volontairement choisis antagonistes. En effet, nous avons déjà établi ce constat sur les performances de l'encours et du retard lors de l'analyse des résultats de simulation sur les différents cas traités au troisième chapitre. Dans ce cas, nous avons montré qu'en utilisant l'opérateur de l'intégrale de Choquet sous sa forme 2-additive, nous obtenons une meilleure compensation entre les performances de l'encours et du retard comparées à l'opérateur de la somme pondérée. Comme la performance du temps de production est proportionnelle à celle de l'encours, alors il y a redondance entre ces deux performances.

Partant de ce constat, nous adoptons l'opérateur de l'intégrale de Choquet 2-additive dans le mécanisme d'agrégation du superviseur. Ses paramètres (donnés par expertise) sont fixés de la façon suivante :

- les indices de Shapley sont choisis tous identiques ($\phi_{jl} = 1/3, l = 1, 2, 3$ et $j = 1, 2$),
- les coefficients d'interactions pour les deux types de production sont : $I_{12} = 0.2, I_{13} = 0.25$ et $I_{23} = -0.3$.

Les intervalles flous associées aux objectifs, formalisés par les profils, sont choisis comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{11}^{\text{obj}}(\alpha) = [(-3 + 2\alpha), (3 - 2\alpha)] \\ P_{12}^{\text{obj}}(\alpha) = [(3 + 2\alpha), (11 - \alpha)] \\ P_{13}^{\text{obj}}(\alpha) = [(5 + 4\alpha), (18 - 2\alpha)] \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} P_{21}^{\text{obj}}(\alpha) = [(-3 + 2\alpha), (3 - 2\alpha)] \\ P_{22}^{\text{obj}}(\alpha) = [(2 + \alpha), (7 - \alpha)] \\ P_{23}^{\text{obj}}(\alpha) = [(4 + 2\alpha), (14 - 2\alpha)] \end{array} \right.$$

Les intervalles flous des objectifs P_{jl}^{obj} sont illustrés sur la Figure 4.16.

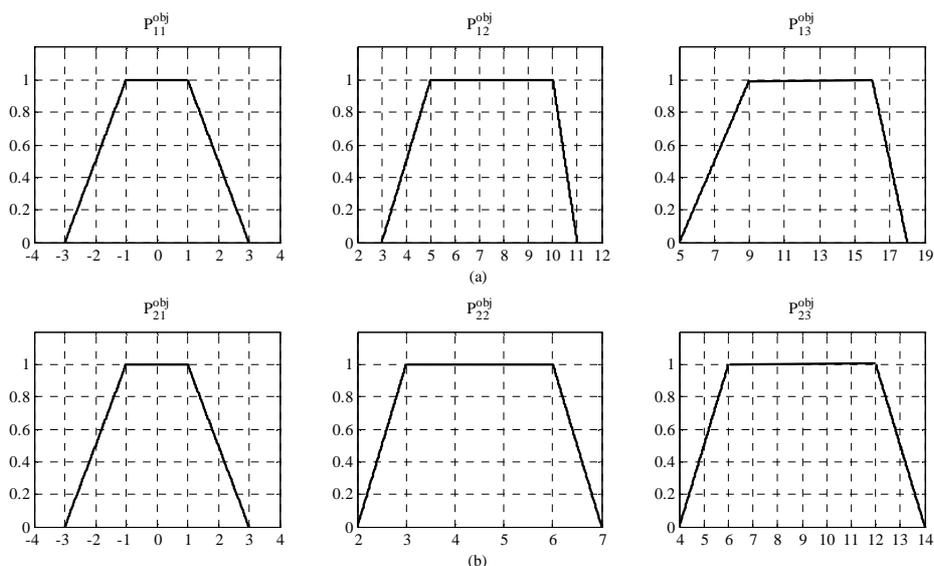


Figure 4.16 : Les intervalles flous des objectifs de production : (a) type 1, (b) type 2.

En considérant les paramètres choisis précédemment, l'application de l'opérateur de l'intégrale de Choquet 2-additive sur les intervalles $P_{jl}^{obj}(\alpha)$ donne les intervalles flous des l'objectifs agrégés pour chaque type de produits comme suit :

$$P_{1,ag}^{obj}(\alpha) = \begin{cases} (P_{1,ag}^{obj})^-(\alpha) = \frac{163}{60}\alpha - \frac{11}{30} \\ (P_{1,ag}^{obj})^+(\alpha) = -\frac{23}{12}\alpha + \frac{217}{24} \end{cases} ; P_{2,ag}^{obj}(\alpha) = \begin{cases} (P_{2,ag}^{obj})^-(\alpha) = \frac{23}{12}\alpha - \frac{3}{40} \\ (P_{2,ag}^{obj})^+(\alpha) = -\frac{23}{12}\alpha + \frac{291}{40} \end{cases}$$

La forme de l'intervalle flou de l'objectif agrégé résultant associé à chacun des deux types de produits est illustrée sur la Figure 4.17.

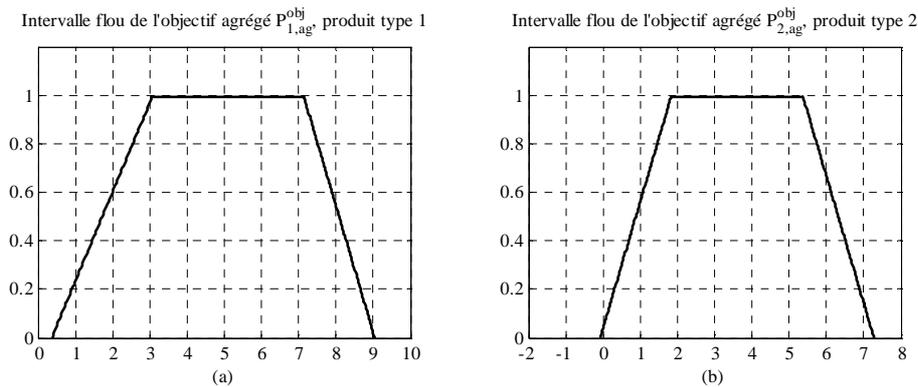


Figure 4.17 : Intervalle flou de l'objectif agrégé : (a) processus 1, (b) processus 2.

3.2.3. Résultats de simulation

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation sur un horizon de 2880 heures (qui correspond à une production sur 12 mois pour des machines travaillant 12 h/jour, 4 jours par semaine). Ces résultats sont obtenus par un contrôle distribué puis par un contrôle supervisé avec le mécanisme d'agrégation des objectifs.

Les tendances moyennes de chacun des indicateurs du retard, de l'encours et du temps de production sont donnés sur les Figure 4.18, Figure 4.19 et Figure 4.20.

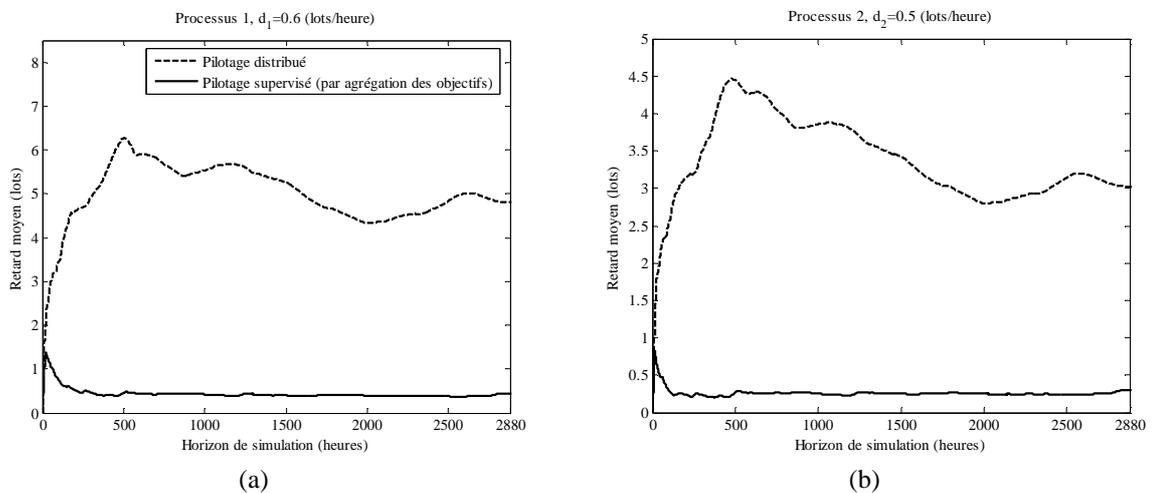


Figure 4.18 : Retard moyen : (a) processus 1, (b) processus 2.

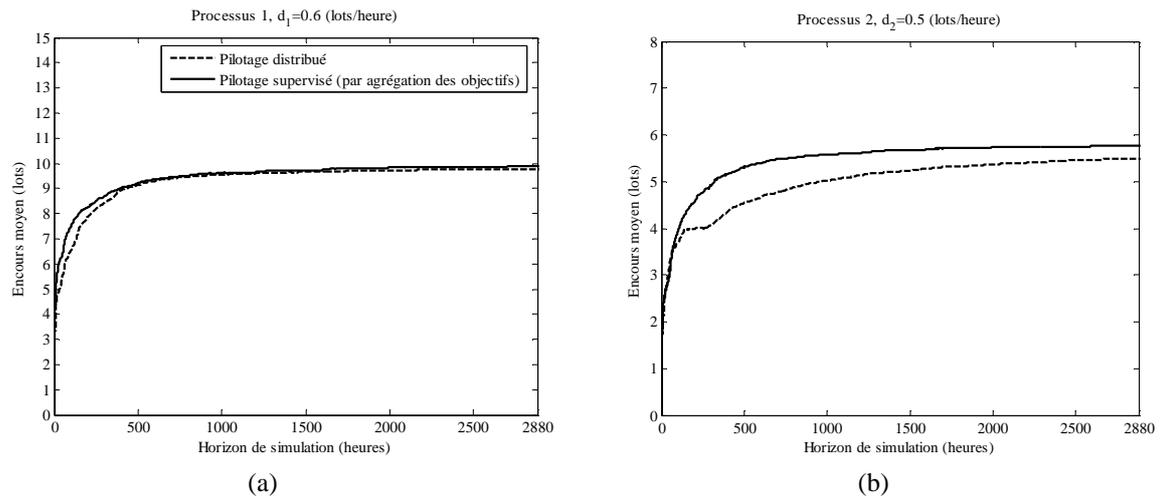


Figure 4.19 : Encours moyen : (a) processus 1, (b) processus 2.

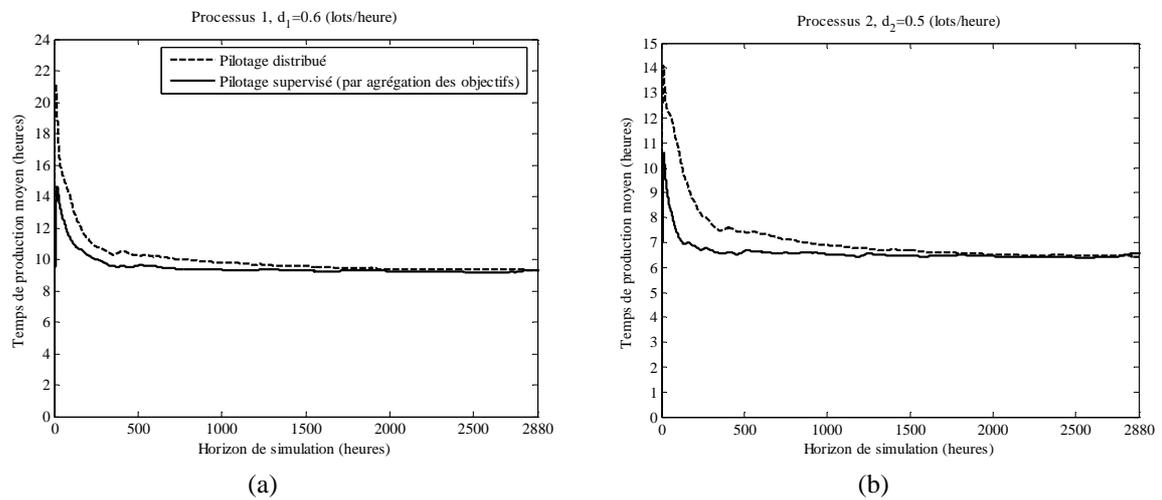


Figure 4.20 : Temps de production moyen : (a) processus 1, (b) processus 2.

Le Tableau 4.14 présente l'estimation statistique des résultats de simulation obtenus sur les 10 réplifications.

Tableau 4.14 : Estimation statistique des résultats de simulation.

		Approche distribuée			Approche supervisée par agrégation des objectifs		
		Encours (lots)	Retard (lots)	Temps de production (heures)	Encours (lots)	Retard (lots)	Temps de production (heures)
Processus 1 : $d_1 = 0.6$ (lots/heure)	Moyenne	9.768	4.801	9.300	9.908	0.447	9.316
	Ecart type	0.136	1.505	0.199	0.128	0.167	0.303
	Maximum	9.883	7.059	9.567	10.052	0.642	9.745
	Niveau de confiance	0.99	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99
Processus 2 : $d_2 = 0.5$ (lots/heure)	Moyenne	5.491	3.026	6.433	5.771	0.296	6.541
	Ecart type	0.063	0.943	0.187	0.065	0.128	0.336
	Maximum	5.590	4.392	6.594	5.875	0.450	6.883
	Niveau de confiance	0.95	0.99	0.975	0.95	0.99	0.99

3.2.4. Discussion

Les résultats obtenus montrent une nette amélioration des retards (Cf. Figure 4.18), tandis que les performances de l'encours et du temps de production restent très proches du cas sans supervision (Cf. Figure 4.19 et Figure 4.20). Ceci s'explique par le fait que le superviseur agit sur la performance du surplus en stabilisant les retards à un niveau acceptable (Cf. Figure 4.18), alors que les encours et les temps de production se maintiennent à leur niveau de fonctionnement normal (Cf. Figure 4.19 et Figure 4.20).

Les différentes applications traitées dans cette partie nous ont permis de valider la faisabilité de l'approche de pilotage des flux en tenant compte de différents phénomènes qui se produisent dans une installation réelle ainsi que les interactions existantes entre les performances désirées. Bien que les résultats obtenus nous semblent intéressants, il reste néanmoins à mettre cette méthode en grandeur réelle par rapport à des objectifs fournis par un responsable de production (implantation réelle).

Toutefois, il est important d'insister sur certaines difficultés rencontrées lors de l'implantation des exemples applicatifs traités dans ce chapitre. En effet, la première difficulté, qui a été déjà soulignée dans le Chapitre 2, concerne l'estimation des paramètres des contrôleurs locaux. A ce niveau, une surestimation de ces paramètres peut conduire à des encours important alors qu'une sous-estimation induit d'important retard. Trouver les paramètres optimaux est particulièrement difficile lorsque la demande est élevée. La deuxième difficulté rencontrée est liée à la quantification des objectifs globaux pour la supervision. En effet, ces derniers sont fortement tributaires d'une connaissance approfondie sur le système physique, de leurs indicateurs de performance et leurs interactions.

4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons illustré l'approche de commande et supervision développée dans cette thèse afin de valider sa faisabilité sur des cas complexes. Ainsi, nous avons détaillé dans un premier temps, l'extension de l'approche de pilotage et de simulation aux cas de systèmes multi-produits. Nous avons montré que la problématique est essentiellement liée au partage de la capacité maximale des ressources entre les différents flux de produits circulant dans le système. La méthodologie de synthèse de la commande locale et du superviseur reste inchangée.

Dans un second temps, nous avons mené une série de simulations sur des systèmes complexes proches de la réalité. Un premier exemple illustratif simple à 3 machines et 2 produits nous a permis de décliner la méthodologie proposée en mettant l'accent sur le choix du mécanisme de supervision et des opérateurs d'agrégation adoptés en fonction des objectifs fixés.

Un deuxième exemple plus complexe, tiré de la littérature, nous a servi pour confronter notre approche à une technique de pilotage distribué et supervisé proche de la problématique abordée dans cette thèse. Aussi, la robustesse de l'approche vis-à-vis des aléas de fonctionnement du système et de son environnement a pu être évaluée. Le système est un cas combinant des opérations de transformation, d'assemblage et de désassemblage avec des phases cycliques. Cette dernière caractéristique est intrinsèque à certaines industries à forte densité des flux. Enfin, nous avons terminé par une application dans le domaine de la production des semi-conducteurs.

D'autres aspects dans le pilotage des flux tels que la présence d'incertitude sur les paramètres des contrôleurs locaux, la quantification des objectifs, etc., sont en cours d'étude. Ces points constituent une de nos perspectives de recherche. Ces perspectives sont énoncées après le bilan de nos travaux dans la conclusion générale.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

La complexité sans cesse croissante des systèmes de production a fait des méthodes de simulation un des outils les plus répandus et, dans certains cas, le seul dont on dispose pour l'étude de ces systèmes à un coût raisonnable. Pour cette raison, toute technique visant à améliorer l'efficacité de cette approche est d'un très grand intérêt. Dans cette optique, l'introduction du pilotage dans la simulation a été d'un grand apport [Berchet, 2000].

Toutefois, les concepts de pilotage déployés actuellement restent limités sur plusieurs aspects et plus particulièrement sur leur faculté d'évolution et d'adaptation. En effet, l'absence de toute méthodologie de synthèse dans la conception d'un système de pilotage rend la démarche empirique et difficilement exploitable pour des systèmes de grande dimension et en présence de fortes interactions entre les éléments les constituant. Cette lacune méthodologique apparaît clairement lorsque le pilotage est abordé sous l'angle du contrôle-commande au sens de la régulation, du suivi de trajectoire, etc., et en attachant un intérêt tout particulier à des notions telles que la faisabilité d'un objectif, la commandabilité ou encore la robustesse d'une stratégie de pilotage.

Une autre limite dans la conception actuelle du pilotage en simulation se situe dans la difficulté à optimiser le fonctionnement global d'un système de production. En effet, bien que les structures de pilotage proposées dans ce contexte sont souvent distribuées avec un niveau supérieur de coordination et de supervision [Ghabri, 1995 ; Trentesaux, 1996 ; Berchet, 2000], leur déploiement pratique demeure restreint au niveau opérationnel. Dans ce cas, la difficulté réside en l'intégration des performances globales du système lors de l'élaboration de l'action locale dans le but de maintenir et/ou d'améliorer des performances.

Ainsi, les travaux présentés dans cette thèse ont pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces limitations et ont abouti à la proposition d'une méthodologie de pilotage distribuée et supervisée des flux de production en tenant compte à la fois des objectifs locaux et globaux.

Bilan

Le travail réalisé dans cette thèse a donc porté sur deux points majeurs :

- Proposer un cadre de modélisation et de simulation adéquat afin de piloter les flux de production à forte cadence.
- Développer une méthodologie de synthèse d'un système de pilotage capable de réguler les flux de production au niveau physique (opérationnel) et d'assurer le respect et le suivi des spécifications globales (au niveau décisionnel).

En ce qui concerne le premier point, l'application de modèles continus de circulation des flux à travers des modules de production élémentaires, issus de la décomposition du système global, a permis d'aborder plus efficacement la simulation des systèmes de production à forte densité de produits. Dans ce cas, il ne s'agit plus de considérer chaque produit au sein du système (cas des modèles discrets), mais plutôt d'approcher leur évolution comme un fluide. Cette modélisation a permis d'explicitier, sous forme de représentation d'état, la relation entre les variables d'entrée (taux de production des modules élémentaires), les variables de sortie (production) et les variables d'état (« charge » des stocks intermédiaires). A travers cette

représentation, on pouvait dès lors énoncer des propriétés sur le système de pilotage telles que la faisabilité, la commandabilité, la stabilité, etc.

En ce qui concerne le second point, la deuxième partie de cette thèse a été consacrée au développement d'une méthodologie de pilotage des flux. Ainsi, le choix de l'architecture distribuée-supervisée a été argumenté par l'aspect modulaire des entités de production considérées (module élémentaire) et par le besoin d'introduire les objectifs globaux du système dans le pilotage pour garantir le respect des spécifications du niveau décisionnel.

Dans le système de pilotage synthétisé, le problème de régulation des flux a été abordé du point de vue « allocation de capacité » en s'appuyant sur la notion du surplus, qui traduit la différence entre la production (sortie) et la demande (objectif) cumulées, et la théorie du contrôle flou. En effet, la conception d'un contrôle à base du surplus a été l'une des premières approches visant à transposer les concepts de la théorie de contrôle des systèmes continus au pilotage des flux de production sous forme de problème de suivi de trajectoire. Par ailleurs, la difficulté des approches analytiques traditionnelles à synthétiser le problème de pilotage des flux des systèmes complexes et la présence d'incertitudes à la fois sur le système et sur son environnement, ont été les principales motivations qui ont guidé notre choix de technique issue de l'intelligence artificielle à travers le formalisme flou.

Au niveau supervision, nos propositions ont consisté à synthétiser des mécanismes de supervision sur la base des performances globales (les objectifs associés) pour élaborer une composante additive à appliquer au niveau opérationnel suivant le mode de fonctionnement du système.

En ce sens, les concepts développés pour la supervision ont été :

- la représentation des objectifs par des intervalles conventionnels ou flous,
- la formalisation des mécanismes d'agrégation des indicateurs de performance et leurs objectifs assignés,
- l'élaboration de l'action agrégée dite de supervision et son déploiement au niveau opérationnel sous forme de composante additive à la commande locale.

Ainsi, les différents mécanismes de supervision qui ont été proposés se distinguent par :

- la représentation des objectifs,
- le formalisme d'agrégation,
- la démarche de synthèse de l'action agrégée de supervision.

Dans le premier point, deux représentations ont été étudiées. La première a été menée en considérant le formalisme à base d'intervalles conventionnels avec un niveau de confiance maximal pour toutes les valeurs comprises à l'intérieur de l'intervalle, et nul en dehors. Le principal inconvénient qui a été constaté sur cette représentation réside dans les commutations franches entre les différents modes de fonctionnement du système qui peuvent être source d'instabilité. Afin de remédier à ce problème, une deuxième représentation à base d'intervalles flous a été considérée. Dans ce cas, différents niveaux de confiance sont accordés aux zones de commutation entre les différents modes de fonctionnement du système. Les commutations sont ainsi conduites par la relation linéaire entre le niveau de confiance (ou niveau de coupe) de la performance mesurée et l'action relative au mode de fonctionnement

constaté du système. Ce résultat a permis « d'adoucir » les commutations et par conséquent, d'avoir des performances plus stables.

Dans le deuxième point, deux formalismes d'agrégation ont été proposés. Le premier, fondé sur l'utilisation des règles floues, présente l'avantage de pouvoir exploiter pleinement l'expertise humaine mais limité à un nombre restreint de paramètres (informations globales). Le second s'appuie sur des opérateurs d'agrégation dont le pouvoir de formalisation dans des situations conflictuelles est bien établi. Cependant, le problème de détermination de ses paramètres (choix de l'opérateur, valeurs des poids, etc.) reste tributaire d'une connaissance approfondie du système et de ses performances.

Enfin, pour le troisième point, deux démarches de synthèse ont été développées qui consistent pour l'une à élaborer l'action pour chaque performance évaluée séparément pour ensuite agréger les actions résultantes. Pour l'autre, il s'agissait d'agréger les performances obtenues en premier lieu, après quoi l'action de supervision est élaborée par comparaison entre la performance agrégée et son objectif agrégé. Cette deuxième démarche présente l'avantage de pouvoir intégrer des préférences aux différentes performances considérées.

Sur le plan applicatif, l'accent a été mis sur la faisabilité de la démarche de pilotage proposée sur des cas applicatifs complexes à forte densité de produits. En ce sens, l'aspect multi-produits ainsi que les phases cycliques dans les séquences de production ont été particulièrement considérés.

Perspectives

Ce travail ouvre plusieurs voies de recherche aussi bien sur le modèle utilisé en simulation que sur le système de pilotage des flux.

En ce qui concerne le modèle de simulation, dans la formulation que nous utilisons, nous supposons des temps opératoires déterministes en négligeant les temps de transfert et de reconfiguration. Une étude sur les conditions de validité du modèle fluide en présence de temps non déterministe [Helber, 1998 ; Manitz, 2008] ainsi que l'effet de la prise en compte des temps de transfert [Chan et al., 2007 ; Mourani et al., 2008] et de reconfiguration permet d'améliorer l'efficacité de la simulation.

Concernant le système de pilotage, plusieurs améliorations sont à envisager. En effet, au niveau de la commande locale, la synthèse des contrôleurs flous est actuellement fondée sur des règles élaborées par expertise. Si pour le processus de transformation cette procédure reste assez simple étant donné que le nombre d'entrées reste figé, la généralisation aux processus d'assemblage et de désassemblage pose un problème d'explosion combinatoire de la base de règles. En effet, le nombre de stocks adjacents (variables d'entrées) est plus important ce qui se traduit par une base de règles plus complexe. Dans ce cas, il serait intéressant d'exploiter le cas général de la représentation multilinéaire par morceaux à n entrées d'un système flou numérique, développée dans [Boukezzoula, 2000 ; Galichet et al., 2004], afin d'explicitier analytiquement la relation entre les entrées et la sortie du module de contrôle local. L'étude de la stabilité de la loi de commande locale à travers la représentation obtenue serait alors possible.

Un autre volet qui peut être amélioré au niveau de la commande locale concerne la méthode utilisée pour estimer les univers de discours des entrées des contrôleurs locaux. Dans le cadre de cette thèse, nous avons limité son application à des cas où uniquement des opérations de

transformation sont présentes. Cette procédure doit donc être étendue pour des séquences incluant des opérations d'assemblage et de désassemblage. Par ailleurs, les travaux entrepris dans [Tsourveloudis et al., 2007], qui utilisent des approches évolutionnistes pour fixer les paramètres optimaux des contrôleurs flous (nombre de symboles flous) minimisant les coûts de production, constituent une alternative intéressante pour améliorer les performances de la commande locale.

Enfin, à moyen terme, une idée à développer serait de considérer le cas de séquences non linéaires ou de séquences alternatives [Helber, 1999] dans la synthèse de la commande locale par le formalisme flou. D'autre part, une conception et une analyse du module de contrôle local en s'appuyant sur l'arithmétique à base d'intervalles flous [Klir, 1997] est une autre voie à explorer. Dans ce cas, les incertitudes sur les paramètres du contrôleur peuvent être spécifiées par le niveau de confiance (niveau de coupe) de la représentation par intervalles flous considérée. Ainsi, l'objectif de la commande locale peut être vu comme un problème de maintien des performances du module de production contrôlé à l'intérieur d'une enveloppe de tolérance autour d'une trajectoire exacte spécifiée par le degré de confiance sur une trajectoire floue [Boukezzoula et al., 2006].

Quant aux mécanismes de supervision proposés, il est clair que les performances obtenues sont fortement liées au choix des intervalles de tolérance et aux paramètres des opérateurs d'agrégation utilisés. Nous avons pu constater qu'un mauvais choix peut conduire à une détérioration des performances voire une instabilité du système. Une analyse approfondie s'avère nécessaire pour trouver les intervalles les mieux adaptés aux objectifs de production et à la capacité du système. Ce point est en lien avec la problématique de l'identification fine de la stratégie des décideurs qui doit passer par une procédure de recueil plus évoluée (de type MACBETH par exemple [Bana e Costa and Changas, 2004]). Il est également intéressant d'exploiter ce type de procédure structurée dans la détermination des paramètres des opérateurs d'agrégation considérés en supervision. Par ailleurs, une étude détaillée sur l'application d'autres opérateurs d'agrégation que ceux employés dans cette thèse est souhaitable.

Enfin, en ce qui concerne l'outil de simulation lui-même, les modèles fluides des exemples considérés ont été implantés à l'aide de l'outil MATLAB/Simulink et les contrôleurs flous sont implantés en utilisant la librairie Floulib. Les fonctions de supervision ont été écrites sous l'éditeur MATLAB. Dans ce contexte, un travail de développement d'une « boîte à outils » intégrant les différentes fonctionnalités proposées reste à réaliser.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [Ait Hssain, 2000] Ait Hssain A., “Optimisation des flux de production. Méthodes de simulation”, Editions Dunod, 2000.
- [Akella and Kumar, 1986] Akella R. and Kumar P.R., “Optimal control of production rate in failure prone manufacturing systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 31, N° 2, pp. 116–126, 1986.
- [Akyol and Bayhan, 2007] Akyol D.E., Bayhan G.M., “A review on evolution of production scheduling with neural networks”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 53, N° 1, pp. 95–122, 2007.
- [Alla and David, 1998] Alla H. and David R., “Continuous and Hybrid Petri Nets”, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 8, N° 1, pp. 159–188, 1998.
- [Altiparmak et al., 2007] Altiparmak F., Dengiz B. and Bulgak A.A., “Buffer allocation and performance modeling in asynchronous assembly system operations: An artificial neural network metamodeling approach”, *Applied Soft Computing*, Vol. 7, N° 3, pp. 946–956, 2007.
- [Ancelin et Semery, 1987] Ancelin B., Semery A., “Calcul de la productivité d’une ligne intégrée de fabrication : CALIF, une méthode analytique industrielle”, *RAIRO APII*, Vol. 21, N° 3, pp. 209–238, 1987.
- [Andreu, 1996] Andreu D., “Commande et supervision des procédés discontinus : une approche hybride”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1996.
- [Angsana and Passino, 1994] Angsana A. and Passino K.M., “Distributed Fuzzy Control of Flexible Manufacturing Systems”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 2, N° 4, pp. 423–435, 1994.
- [Archimède, 1991] Archimède B., “Conception d’une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production”, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, France, 1991.
- [Baccelli et al., 1992] Baccelli F., Cohen G., Olsder G.J. and Quadrat J.P., “Synchronization and Linearity”, Wiley and Sons, 1992.
- [Bai, 1991] Bai S.X., “Scheduling Manufacturing Systems with Work-in-Process Inventory Control”, Ph. D. thesis, Operations Research Center, MIT, Cambridge, 1991.
- [Bai and Gershwin, 1994] Bai X. and Gershwin S.B., “Scheduling Manufacturing Systems with Work-In-Process Inventory Control: Multiple-Part-Type Systems”, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, N° 2, pp. 365–385, 1994.
- [Bai and Gershwin, 1995] Bai X. and Gershwin S.B., “Scheduling Manufacturing Systems with Work-In-Process Inventory Control: Single-Part-Type Systems”, *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 599–617, 1995.
- [Bakalem, 1996] Bakalem M., “Modélisation et simulation orientées objet des systèmes manufacturiers”, Thèse de doctorat, Université de Savoie, 1996.
- [Bana e Costa and Changas, 2004] Bana e Costa C. and Changas M., “A career choice problem: an example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgements”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, pp. 323–331, 2004.
- [Banks et al., 1995] Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., “Discrete event system simulation”, 2nd Edition, Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, W.J. Fabrycky and J.H. Mize Editors, 1995.
- [Balduzzi and Menga, 1998] Balduzzi F. and Menga G., “A State Variable Model for the Fluid Approximation of Flexible Manufacturing Systems”, In *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, pp. 1172–1178, 1998.
- [Balduzzi et al., 2000] Balduzzi F., Giua G., Menga G., “First order hybrid Petri nets: a model for optimization and control”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, N° 4, pp. 382–399, 2000.
- [Balduzzi et al., 2001] Balduzzi F., Giua G., Seatzu C., “Modeling and simulation of manufacturing systems with first order hybrid Petri nets”, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, N° 2, pp. 255–282, 2001.

-
- [Baynat, 2000] Baynat B., “Théorie de files d’attente : des chaînes de Markov aux réseaux à forme produit”, Paris, Hermès Science Publications, 2000.
- [Becker and Scholl, 2006] Becker C. and Scholl A., “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, N° 3, pp. 694–715, 2006.
- [Berchet, 2000] Berchet C., “Modélisation pour la simulation d’un système d’aide au pilotage industriel”, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 2000.
- [Berrah, 1997] Berrah L., “Une approche d’évaluation de la performance industrielle- Modèle d’indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif”, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1997.
- [Berruet, 1998] Berruet P., “Contribution au recouvrement des systèmes flexibles de production manufacturière : analyse de la tolérance et reconfiguration”, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1998.
- [Bielecki and Kumar, 1988] Bielecki T. and Kumar P.R., “Optimality of zero inventory policies for unreliable manufacturing systems”, *Operations Research*, Vol. 36, N° 4, pp. 532–541, 1988.
- [Bispo, 1997] Bispo C.F.G., “Re-entrant flow lines”, Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1997.
- [Blohlavek, 2000] Blohlavek R., “A note on the extension principle”, *J. Math. Anal. Appl.*, Vol. 248, N° 2, pp. 678–682, 2000.
- [Bongaerts et al., 2000] Bongaerts L., Monostori L., McFarlane D. and Kádár B., “Hierarchy in distributed shop floor control”, *Computers in Industry*, Vol. 43, N°2, pp. 123–137, 2000.
- [Boukezzoula, 2000] Boukezzoula R., “Commande floue d’une classe de systèmes non-linéaires : application au problème de suivi de trajectoire”, Thèse de doctorat, Université de Savoie, Annecy, France, 2000.
- [Boukezzoula et al., 2003] Boukezzoula R., Galichet S., Foulloy L., “Nonlinear Internal Model Control: Application of Inverse Model Based Fuzzy Control”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 11, N° 6, pp. 814–829, 2003.
- [Boukezzoula et al., 2006] Boukezzoula R., Foulloy L. and Galichet S., “Inverse Controller Design for Interval Fuzzy Systems”, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, Vol. 14, N° 1, pp. 111–124, February, 2006.
- [Boukezzoula et al., 2007a] Boukezzoula R., Galichet S. and Foulloy L., “Inverse arithmetic operators for fuzzy intervals”, In *Proceeding of 5th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT’07)*, Ostrava, République Tchèque, Vol. 2, pp. 279–286, September 2007.
- [Boukezzoula et al., 2007b] Boukezzoula R., Galichet S., Foulloy L., “MIN and MAX Operators for Fuzzy Intervals and their Potential Use in Aggregation Operators”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 15, N° 6, pp. 1135–1144, December 2007.
- [Boysen et al., 2007] Boysen N., Fliedner M., Scholl A. “A classification of assembly line balancing problems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, N° 2, pp. 674 – 693, 2007.
- [Brandimarte et al., 1996] Brandimarte P., Sharifnia A. and Von Turkovich B.F., “Continuous Flow Models of Manufacturing Systems: a Review”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 45, N° 1, pp. 441–444, 1996.
- [Burman, 1995] Burman M.H., “New Results in Flow Line Analysis”, Ph. D. thesis, Operations Research Center, MIT, Cambridge, 1995.
- [Buzacott and Shanthikumar, 1993] Buzacott J.A. and Shanthikumar J.G., “Stochastic models of manufacturing systems”, Prentice Hall, 1993.
- [Campagne et Burlat, 2001] Campagne J.P. et Burlat P., “Maîtrise des flux industriels”, Paris, Hermès Science Publications, 2001.
- [Cassandras and Lafortune, 1999] Cassandras C.G. and Lafortune S., “Introduction to discrete event systems”, Kluwer Academic, 1999.
- [Cauffriez, 2005] Cauffriez L., “Méthodes et modèles pour l’évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes automatisés complexes”, Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes, 2005.
- [Caux, 2006] Caux C., “Rationalisation des flux dans les systèmes de production”, Habilitation à diriger des recherches, Université de Clermont-Ferrand, 2006.
-

-
- [Chan et al., 2007] Chan F.T.S., Wang Z. and Zhang J., “A two-level hedging point policy for controlling a manufacturing system with time delay, demand uncertainty and extra capacity”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, N° 3, pp. 1528–1558, 2007.
- [Chang et al., 2007] Chang C.-Y., ChunHsi L., Jia-Wei C., MuDer J., “An unsupervised neural network approach for automatic semiconductor wafer defect inspection”, *Expert Systems with Applications*, 2007.
- [Chiu and Wang, 2002] Chiu C.-H. and Wang W.-J., “A simple computation of MIN and MAX operations for fuzzy numbers”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 126, N° 2, pp. 273–276, 2002.
- [Cho, 2005] Cho S., “A distributed time-driven simulation method for enabling real-time manufacturing shop floor control”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 49, N° 4, pp. 572–590, 2005.
- [Clivillé, 2004] Clivillé V., “Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d’un système d’indicateurs de performance”, Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2004.
- [Custodio et al., 1994] Custodio L.M.M., Sentieiro J.J.S. and Bispo C.F.G., “Production planning and scheduling using a fuzzy decision system”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, N° 2, pp.160–168, 1994.
- [Dai, 1996] Dai J.G., “A fluid limit model criterion for instability of multiclass queuing networks”, *Annals of Applied Probability*, Vol. 6, pp. 751–757, 1996.
- [Dai and Weiss, 1996] Dai J.G. and Weiss G., “Stability and instability of fluid models for re-entrant lines”, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 21, pp. 115–134, 1996.
- [Dallery et al., 1989] Dallery Y., David R. and Xie X.-L., “Approximate analysis of transfer lines unreliable machines and finite buffers”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, N° 9, pp. 943–953, 1989.
- [Dallery and Gershwin, 1992] Dallery Y. and Gershwin S.B., “Manufacturing flow lines: A review of models and analytical results”, *Queuing Systems: Theory and Applications*, special issue on Queuing Models of Manufacturing Systems, Vol. 12, pp. 3–94, 1992.
- [Dallery and Liberopoulos, 2000] Dallery Y. and Liberopoulos G., “Extended kanban control system: Combining kanban and base stock”, *IIE Transactions on Design and Manufacturing*, Vol. 32, N° 4, pp. 369–386, 2000.
- [Dauphin Tanguy, 2003] Dauphin Tanguy G., “Les Bond Graphs”, Paris, Hermès Science Publications, 2003.
- [De Koster, 1987] De Koster M., “Estimation of line efficiency by aggregation”, *International Journal of Production Research*, Vol. 25, pp. 615–626, 1987.
- [Dégrés et al., 2005] Dégrés L., Pierreval H., Caux C., “Analysis of the effects of the variation in the demand of products in a Steel Industry: a System Dynamics approach”, In *Proceeding of International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 2005*, pp. 894 – 903, 2005.
- [Denguir-Rekik et al., 2006] Denguir-Rekik A., Mauris G. and Montmain J., “Propagation of uncertainty by the possibility theory in Choquet integral-based decision making: Application to e-commerce website choice support”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 55, N° 3, pp. 721–728, 2006.
- [Deshpande, 1999] Deshpande S.P., “A Scheduling Policy Experiment for Lean Implementation”, Master of Science Thesis, MIT Technology and Policy Program, 1999.
- [Dilts et al., 1991] Dilts D.M., Boyd N.P. and Whorms H.H., “The evolution of control architectures for Automated Manufacturing Systems”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, N° 1, pp.79–93, 1991.
- [Dindeleux, 1992] Dindeleux E., “Proposition d’un modèle et d’un système interactif d’aide à la décision pour la conduite d’atelier”, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 1992.
- [Di Mascolo, 1990] Di Mascolo M., “Modélisation et évaluation de performances de systèmes de production gérés en Kanban”, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1990.
- [Dolgui et al., 2006] Dolgui A., Guschinsky N. and Levin G., “A special case of transfer lines balancing by graph approach”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, N° 3, pp. 732–746, 2006.
- [Dreyfus et al., 2004] Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M. B., Badran F., Thiria S., Hérault L., “Réseaux de neurones : Méthodologies et Applications”, 2^{ème} édition, Editions Eyrolles, Paris, 2004.
- [Dubois et Forestier, 1982] Dubois D. et Forestier J.P., “Productivité et encours moyen d’un ensemble de deux machines séparées par une zone de stockage”, *Revue RAIRO*, Vol. 16, pp. 105–132, 1982.
-

-
- [Dubois et al., 2003] Dubois D., Fargier H. and Fortemps Ph., “Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 147, pp. 231–252, 2003.
- [Dubois and Prade, 2004] Dubois D. and Prade H., “On the use of aggregation operations in information fusion processes”, *Fuzzy Sets Systems*, Vol. 142, N° 1, pp. 143–161, 2004.
- [Dubois et al., 2004] Dubois D., Fargier H. and Fortin J., “A generalized vertex method for computing with fuzzy intervals,” In *Proceeding of Fuzzy IEEE Conference*, pp. 541–546, 2004.
- [Dubois et al., 2005] Dubois D., Fargier H. and Fortin J., “The empirical variance of a set of fuzzy intervals”, In *Proceeding of Fuzzy IEEE Conference*, pp. 885–890, 2005.
- [Duffie and Prabhu, 1996] Duffie N.A. and Prabhu V.V., “Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13, N° 2, pp. 270–281, 1996.
- [Ershler et Grabot, 2001] Ershler J. et Grabot B., “Gestion de production : fonctions, techniques et outils”, Paris, Hermès Science Publications, 2001.
- [Feng and Xiao, 2002] Feng Y. and Xiao B., “Optimal threshold control in discrete failure prone manufacturing system”, *IEEE Transactions on Automatic and Control*, Vol. 7, N° 47, pp.1167–1174, 2002.
- [Ferrier, 2003] Ferrier J.L., “Modèle et système : un tour d’horizon”, Notes de cours de DEA automatique et informatique industrielle, Université d’Angers-Ecole centrale de Nantes, disponible sur : www.istia.univ-angers.fr/~ferrier, 2003.
- [Filliger, 2005] Filliger R., “From car traffic to production flows. A guided tour through solvable stochastic transport processes”, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2005.
- [Fishwick, 1995] Fishwick P.A., “Simulation Model Desing and Execution”, Prentice Hall, 1995.
- [Foulloy et al., 2006] Foulloy L., Boukezzoula R. and Galichet S., “An educational tools for fuzzy control”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 14, N° 2, pp.217–221, 2006.
- [Fu and Xie, 2002] Fu M. and Xie X., “Derivative estimation for buffer capacity of continuous transfer lines subject to operation-dependent failures”, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Vol. 12, pp. 447–469, 2002.
- [Galichet et al., 2004] Galichet S., Boukezzoula R. and Foulloy L., “Explicit analytical formulation and exact inversion of decomposable fuzzy systems with singleton consequents”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 146, N° 3, pp. 421–436, 2004.
- [Gentil and Montmain, 2004] Gentil G. and Montmain J., “Hierarchical representation of complex systems for supporting human decision making”, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 18, N° 3, pp. 143–159, 2004.
- [Gershwin, 1987a] Gershwin S.B., “An efficient decomposition algorithm for the approximate evaluation of tandem queues with finite storage space and blocking”, *Operations Research*, pp.291–305, 1987.
- [Gershwin, 1987b] Gershwin, S.B., “Representation and analysis of transfer lines with machines that have different processing rates”, *Annals of Operations Research*, Vol. 9, pp.511–530, 1987.
- [Gershwin, 1989] Gershwin S.B., “Hierarchical flow control: a framework for scheduling and planning discrete events in manufacturing systems”, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 77, N° 1, pp. 195–209, 1989.
- [Gershwin, 1994] Gershwin S.B., “Manufacturing Systems Engineering”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [Gershwin, 2000] Gershwin S.B., “Design and Operation of Manufacturing Systems – The Control Point Policy”, *IIE Transactions*, Vol. 32, No 2, pp.891–906, 2000.
- [Gershwin and Schor, 2000] Gershwin S.B. and Schor J.E., “Efficient Algorithms for Buffer Space Allocation”, *Annals of Operations Research*, Vol. 93, pp. 117–144, 2000.
- [Gershwin and Burman, 2000] Gershwin S.B. and Burman M.H., “A Decomposition Method for Analyzing Inhomogeneous Assembly/Disassembly Systems”, *Annals of Operations Research*, Vol. 93, pp. 91–116, 2000.
- [Ghabri, 1995] Ghabri M.-K., “Sur la modélisation et la commande des systèmes flexibles de production”, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1995.
-

-
- [Giard, 2003] Giard V., “Gestion de la production et des flux”, *Economica*, 2003.
- [Gideon, 1998] Gideon C., “Neural networks implementations to control real-time manufacturing systems”, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 11, N° 4, pp. 243–251, 1998.
- [Grabisch, 1995] Grabisch M., “Fuzzy integrals in multicriteria decision making”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 69, pp. 279–298, 1995.
- [Grabisch and Roubens, 2000] Grabisch M. and Roubens M., “Application of the Choquet integral in multicriteria decision making”, In *Fuzzy Measure and Integrals*, New York: Physica-Verlag, pp. 348–374, 2000.
- [Grabisch et al., 2000] Grabisch M., Murofushi T. and Sugeno M., “Fuzzy Measure and Integrals, Theory and Applications”, *Studies in Fuzziness*, Physica Verlag, 2000.
- [Grabisch et Perny, 2003] Grabisch M. et Perny P., “Logique floue, principes, aide à la décision : chapitre Agrégation multicritère”, *Traité IC2, série informatique et systèmes d’information*, Paris Hermès Science Publications, 2003.
- [Grabot et al., 1996] Grabot B., Blanc J.-C. and Binda C. “A decision support system for production activity control Decision Support Systems”, Vol. 16, N° 2, pp. 87–101, 1996.
- [Grabot, 2001] Grabot B., “Artificial intelligence and soft computing for planning and scheduling: how to efficiently solve more realistic problems”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 14, N° 3, pp. 265–267, 2001.
- [Gunasekaran et al., 1995] Gunasekaran A., Martikainen T. and Yli-Olli P., “Flexible manufacturing systems: An investigation for research and applications”, *Manufacturing Research and Technology*, Vol. 23, pp. 3–44, 1995.
- [Güngör and Gupta, 2002] Güngör A. and Gupta S.M., “Disassembly line in product recovery”, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 2569–2589, 2002.
- [Gzouli, 2000] Gzouli O., “Comparison of Scheduling Policies by Simulation”, Master of Science thesis, MIT Operations Research Center, 2000.
- [Habchi, 2001] Habchi G., “Conceptualisation et Modélisation pour la Simulation des Systèmes de Production”, *Habilitation à diriger des recherches*, Université de Savoie, 2001.
- [Habchi and Berchet, 2003] Habchi G. and Berchet C., “A model for manufacturing systems simulation with a control dimension”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 11, N° 1, pp. 21–44, 2003.
- [Helber, 1998] Helber S., “Decomposition of unreliable assembly/disassembly networks with limited buffer capacity and random processing times”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, N° 1, pp. 24–42, 1998.
- [Helber, 1999] Helber S., “Performance analysis of flow lines with non-linear flow of material”, *Springer Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems*, Vol. 473, Springer, 1999.
- [Hetreux, 1996] Hetreux G., « Structure de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions », *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1996.
- [Hopcroft and Ullman, 1979] Hopcroft J. and Ullman J., “Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation”, Addison-Wesley, 1979.
- [Huang et al., 2000] Huang H.H., Wang M.H., Johnson M.R., “Disassembly sequence generation using a neural network approach”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 19, N° 2, pp. 73–82, 2000.
- [Ioannidis et al., 2004] Ioannidis S., Tsourveloudis N.C. and Valavanis K., “Fuzzy supervisory control of manufacturing systems”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 20, N° 3, pp.379–389, 2004.
- [Ioannidis and Tsourveloudis, 2006] Ioannidis S. and Tsourveloudis N. C., “Fuzzy Techniques in Scheduling of Manufacturing Systems”, *Fuzzy Applications in Industrial Engineering*, Springer Series: Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 201, ISBN 3-540-33516-1, 2006.
- [Jang, 2007] Jang, Y.J., “Mathematical Modeling and Analysis of Flexible Production Lines”, *Ph.D. thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2007.
-

-
- [Kimemia and Gershwin, 1983] Kimemia J.G. and Gershwin S.B., “An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System”, *IIE Transactions*, Vol. 15, N° 4, pp. 353–362, 1983.
- [Klir and Yuan, 1995] Klir G. J. and Yuan B., “Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [Klir, 1997] Klir G.J., “Fuzzy arithmetic with requisite constraints,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 91, N° 2, pp. 165–175, 1997.
- [Kouikoglou and Phillis, 1997a] Kouikoglou V.S. and Phillis Y.A., “A continuous-flow model for production networks with finite buffers, unreliable machines, and multiple products”, *International Journal of Production Research*, Vol. 35, pp.381–397, 1997.
- [Kouikoglou and Phillis, 1997b] Kouikoglou V.S. and Phillis Y.A., “Review of a fast simulation method for the analysis of queuing networks”, *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, Vol. 13, pp.73–83, 1997.
- [Kouikoglou, 2002] Kouikoglou V.S., “An efficient discrete event model of assembly/disassembly production networks”, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 4485–4503, 2002.
- [Kulkarni, 1997] Kulkarni V.G., “Fluid models for single buffer systems”, In J.H. Dshalalow editor, *Frontiers In Queuing, Models and Applications In Science and Engineering*, Probability and Stochastic Series, CRC Press, pp. 321–338, 1997.
- [Lambert, 2003] Lambert A.J.D., “Disassembly sequencing: a survey”, *International Journal of Production Research*, Vol. 16, N° 41, pp. 3721–59, 2003.
- [Larminat, 1993] Larminat P., “Automatique : commande des systèmes linéaires”, Editions Hermès, Paris, 1993.
- [Law and Kelton, 2000] Law A.M. and Kelton W.D., “Simulation Modelling and Analysis”, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [Le Moigne 1990] Le Moigne J.L., “La théorie du système général : théorie de la modélisation”, 2^{ème} édition, Paris, 1990.
- [Lee, 1990a] Lee C.C., “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy Logic Controller – Part I”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, N° 2, pp. 404–418, 1990.
- [Lee, 1990b] Lee C.C., “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy Logic Controller – Part II”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, N° 2, pp. 419–435, 1990.
- [Levantesi, 2001] Levantesi R., “Analysis of Multiple Loop Assembly/Disassembly Networks”, Ph.D. thesis, Politecnico di Milano, research performed as an MIT visitor, 2001.
- [Little, 1961] Little J.D.C., “A proof for the Queueing Formula: $L = \lambda W$ ”, *Operations Research*, Vol. 9, N° 3, pp.383–387, 1961.
- [Lodwick and Jamison, 2003] Lodwick W. A. and Jamison K. D. “Special issue: Interfaces between fuzzy set theory and interval analysis—Editorial”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 135, N° 1, pp. 1–3, 2003.
- [Longchamp, 1995] Longchamp R., “Commande numérique de systèmes dynamiques”, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1995.
- [Maimon et al., 1998] Maimon O., Khmelnitsky E. and Kogan, K., “Optimal Flow Control in Manufacturing Systems: Production Planning and Scheduling”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Mamdani, 1974] Mamdani E.H., “Application of Fuzzy Algorithms for Control of a simple Dynamic Plant”, In proceeding of the IEE Control and Science, Vol. 121, N° 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [Manitz, 2008] Manitz M., “Queueing-model based analysis of assembly lines with finite buffers and general service times”, *Computers & Operations Research*, Vol. 35, N° 8, pp. 2520–2536, 2008.
- [Martinelli, 2005] Martinelli F., “Control of manufacturing systems with two-value, production dependent failure rate”, *Automatica*, Vol. 41, N° 1, pp. 1943–1948, 2005.
- [Megri and Boukezzoula, 2008a] Megri F. and Boukezzoula R., “MIN and MAX Operators for Trapezoidal Fuzzy Intervals. Part I: Formalization and Application”, *Fuzzy-IEEE Conference*, Hong Kong, pp. 2333–2338, 2008.
- [Megri and Boukezzoula, 2008b] Megri F. and Boukezzoula R., “MIN and MAX Operators for Trapezoidal Fuzzy Intervals. Part II: Analytical Expressions Proof”, *Fuzzy-IEEE Conference*, Hong Kong, pp. 2339–2344, 2008.
-

-
- [Meyer and Roubens, 2006] Meyer P. and Roubens M., “On the use of the Choquet integral with fuzzy numbers in multiple criteria decision support,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 157, N° 7, pp. 927–938, 2006.
- [Monfared and Steiner, 2000] Monfared A.S. and Steiner S.J., “Fuzzy adaptive scheduling and control systems”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 115, N° 2, pp. 231–246, 2000.
- [Montmain and Gentil, 2000] Montmain J. and Gentil S., “Dynamic causal model diagnostic reasoning for online technical process supervision”, *Automatica*, Vol. 36, N° 8, pp. 1137–1152, 2000.
- [Mourani et al., 2008] Mourani I., Hennequin S., Xie X., “Simulation-based optimization of a single-stage failure-prone manufacturing system with transportation delay”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 112, N° 1, pp. 26–36, 2008.
- [Murata, 1989] Murata T., “Petri nets: properties, analysis and applications”, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 77, N° 4, pp. 541–580, 1989.
- [Minsky, 1968] Minsky M., “Matter, minds and models”, Marvin Minsky, Ed., 1968.
- [Narandra and Mukhopadhyay, 1992] Narandra S.K. and Mukhopadhyay S., “Intelligent control using neural networks”, *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 11–18, 1992.
- [Papadopoulos et al., 1993] Papadopoulos, H.T., Heavey C., and Browne J., “Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design”, Chapman & Hall, 1993.
- [Papadopoulos and Heavey, 1996] Papadopoulos H.T. and Heavey C., “Queueing theory in manufacturing systems analysis and design: A classification of models for production and transfer lines”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 92, pp. 1–27, 1996.
- [Papadopoulos and Vidalis, 1998] Papadopoulos H.T. and Vidalis M.I., “Optimal buffer storage allocation in balanced reliable production lines”, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 5, pp. 325–339, 1998.
- [Papadopoulos and Vidalis, 2001] Papadopoulos H.T. and Vidalis M.I., “A heuristic algorithm for the buffer allocation in unreliable unbalanced production lines”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 41, pp. 261–277, 2001.
- [Passino and Yurkovish, 1998] Passino K.M., and Yurkovish S., “Fuzzy Control”, CA: Addison-Wesley Longman, Menlo Park, 1998.
- [Pavé, 1994] Pavé A., “Modélisation en Biologie et en Ecologie”, Aléas, 1994.
- [Perkins and Kumar, 1989] Perkins J., and Kumar P.R., “Stable Distributed Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing/Assembly/Disassembly Systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, N° 2, pp.139–148, 1989.
- [Perkins et al., 1994] Perkins J.R., Humes C. and Kumar P.R., “Distributed Scheduling of Flexible Manufacturing Systems: Stability and Performance”, *IEEE Transactions on Robotic and Automation*, Vol. 10, N° 2, pp.133–141, 1994.
- [Perkins and Srikant, 1997] Perkins, J.R. and Srikant R., “Scheduling multiple-part-types in an unreliable machine manufacturing system”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, N° 3, pp. 364–377, 1997.
- [Perkins and Kumar, 2001] Perkins J. and Kumar P.R., “Failure prone production systems with uncertain demand”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 46, N° 3, pp. 441–449, 2001.
- [Pierreval, 2006] Pierreval H., “Simulation combinée discret/continu : étude du cas d’une fonderie”, 6^{ème} Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation – MOSIM’06, Rabat, Maroc, 2006.
- [Pierreval et al., 2007] Pierreval H., Bruniaux R. and Caux C., “A continuous simulation approach for supply chains in the automotive industry”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 15, N° 2, pp. 185–198, 2007.
- [Rovithakis et al., 1997] Rovithakis G.A., Gaganis V.I., Perrakis S.E. and Christodoulou M.A., “Manufacturing Systems Modeling using Neural Networks”, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 6, N° 1, pp. 37–47, 1997.
- [Rovithakis et al., 1999] Rovithakis G.A., Gaganis V.I., Perrakis S.E. and Christodoulou M.A., “Real-time control of manufacturing cells using dynamic neural network”, *Automatica*, Vol. 35, N° 1, pp. 139–149, 1999.
-

-
- [Rovithakis et al., 2001] Rovithakis G.A., Gaganis V.I., Perrakis S.E. and Christodoulou M.A., “Application of a neural network scheduler on a real manufacturing system”, *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 9, N° 5, pp.261–270, 2001.
- [Ruiz Usano et al., 1997] Ruiz Usano R., Crespo Marquez A. and Framinan Torres J.M., “Modeling manufacturing systems: a simulation study”, In *Proceedings of the 15th International System Dynamics Conference*, Istanbul (Turkey), pp. 671–674, 1997.
- [Samanta and Al-Araimi, 2001] Samanta B. and Al-Araimi S.A., “An inventory control model using fuzzy logic”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 73, N° 3, pp. 217–226, 2001.
- [Sharifnia, 1994] Sharifnia A., “Stability and Performance of Distributed Production Control Methods based on Continuous-Flow Models”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, N° 4, pp. 725–737, 1994.
- [Spearman et al., 1990] Spearman M.L., Woodruff D.L. and Hopp W.J., “CONWIP: a pull alternative to kanban”, *International Journal of Production Research*, Vol. 28, N° 5, pp. 879-894, 1990.
- [Srivatsan, 1993] Srivatsan N., “Synthesis of Optimal Policies for Stochastic Manufacturing Systems”, Ph.D. thesis, MIT Operations Research Center, 1993.
- [Sudiarso and Labib, 2002] Sudiarso A. and Labib A.W., “A fuzzy logic approach to an integrated maintenance/production scheduling algorithm”, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 3121–3138, 2002.
- [Suhail and Khan, 2005] Suhail A. and Khan Z.A., “Fuzzy control with limited control opportunities and response delay—a production-inventory control scenario”, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 38, N° 1, pp.113–131, 2005.
- [Sugeno, 1999] Sugeno M., “On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents”, *IEEE Transactions on Fuzzy set and Systems*, Vol. 7, N° 2, pp. 201–224, 1999.
- [Suri and Fu, 1994] Suri, R., and Fu B.R., “On using continuous flow model lines to model discrete production lines”, *Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Vol. 4, pp. 127–169, 1994.
- [Takagi and Sugeno, 1985] Takagi T. and Sugeno M., “Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 15, pp. 116–132, 1985.
- [Tamani et al., 2006a] Tamani K., Boukezzoula R. and Habchi G., “Supervised Fuzzy Control in the Simulation of Manufacturing Systems”, In *Proceedings of the 20th annual European Simulation and Modelling Conference (ESM 2006)*, Toulouse, France, pp. 200–204, October 2006.
- [Tamani et al., 2006b] Tamani K., Habchi G. and Boukezzoula R., “Fuzzy Supervision of Adaptive Fuzzy Controllers for Manufacturing Systems”, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation (CIMCA 2006)*, Sydney, Australia, November 2006.
- [Tamani et al., 2007a] Tamani K., Boukezzoula R. and Habchi G., “Fuzzy Supervisory Based Capacity Allocation Control for Manufacturing Systems”, In *Proceeding of FUZZ-IEEE, International Conference on Fuzzy Systems*, London, UK, pp. 1769–1774, July 2007.
- [Tamani et al., 2007b] Tamani K., Boukezzoula R. and Habchi G., “Hierarchical control for continuous flow simulation of manufacturing systems”, In *Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Ljubljana, Slovenia, September, 2007.
- [Tamani et al., 2008a] Tamani K., Boukezzoula R. and Habchi G., “Supervisory based capacity allocation control for manufacturing systems simulation”, Accepted for publication in *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2008.
- [Tamani et al., 2008b] Tamani K., Boukezzoula R., Habchi G., “Approche de pilotage par allocation de capacité utilisant un modèle de simulation à flux continu”, 7^{ème} conférence de Modélisation et SIMulation – MOSIM, Paris, France, 31 Mars au 2 Avril 2008.
- [Terracol and David, 1987] Terracol C. and David R., “An aggregation method for performance evaluation of transfer lines with unreliable machines and finite buffers”, In *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, 1987.
- [Thiel, 1993] Thiel D., “Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production : conception de modèles génériques et simulations”, Thèse de doctorat, Université d’Aix-Marseille III, France, 1993.
-

-
- [Tolio et al., 2002] Tolio T., Gershwin S.B. and Matta A., “Analysis of Two-Machine lines with Multiple Failure Modes”, *IIE Transactions*, Vol. 34, N° 1, pp. 51–62, 2002.
- [Trentesaux, 1996] Trentesaux D., “Conception d’un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production”, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1996.
- [Trentesaux, 2002] Trentesaux D., “Pilotage hétéroarchique des systèmes de production”, Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, 2002.
- [Tsourveloudis et al., 2000] Tsourveloudis N.C., Dretoulakis E. and Ioannidis S., “Fuzzy work-in-process inventory control of unreliable manufacturing systems”, *Information Sciences*, Vol. 127, pp. 69–83, 2000.
- [Tsourveloudis et al., 2007] Tsourveloudis N.C., Dretoulakis E., Ioannidis S., “Work-in-process scheduling by evolutionary tuned fuzzy controllers”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, N° 7–8, pp. 748–761, 2007.
- [Van Ryzin et al., 1993] Van Ryzin G.J., Lou X.-C., Gershwin S.B., “Production Control for a Tandem Two-Machine System,” *IIE Transactions*, Vol. 25, N° 5, pp. 5–20, 1993.
- [Vargas-Villamil et al., 2003] Vargas-Villamil F.D., Rivera D.E., Kempf K.G., “A hierarchical approach to production control of reentrant semiconductor manufacturing lines”, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 11, N° 4, pp. 578–587, 2003.
- [Wein, 1988] Wein L.M., “Scheduling semiconductor wafer fabrication”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 1, N° 3, pp. 115–130, 1988.
- [Wang, 1994] Wang L.X., “Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [Wang et al., 2007] Wang W., Daniel E. Rivera D.E. and Kempf K.G., “Model predictive control strategies for supply chain management in semiconductor manufacturing”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 107, N° 1, pp. 56–77, 2007.
- [Willems, 1991] Willems J., “Paradigms and Puzzles in the Theory of Dynamical Systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 36, pp. 259–294, 1991.
- [Xie, 2002] Xie X., “Fluid-stochastic-event graphs for evaluation and optimisation of discrete-event system with failures”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, N° 3, pp. 360–367, 2002.
- [Yager, 1988] Yager R.R., “On weighted median aggregation operators in multicriteria decision making”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 18, N° 1, pp. 183–190, 1988.
- [Yager and Kacprzyk, 1997] Yager R.R. and Kacprzyk J., (Eds.) “The Ordered Weighted Averaging Operators: Theory and Applications”, Kluwer Academic Publisher: Boston, Dordrecht, London, 1997.
- [Ye and Chen, 2001] Ye H.Q. and Chen H., “Lyapunov method for the stability of fluid networks”, *Operations Research Letters*, Vol. 28, pp. 125–136, 2001.
- [Yu and Cassandras, 2004] Yu H. and Cassandras C.G., “Perturbation analysis for production control and optimization of manufacturing systems”, *Automatica*, Vol. 40, N° 6, pp. 945–956, 2004.
- [Yuniarto and Labib, 2005] Yuniarto M.N. and Labib A.W., “Optimal control of an unreliable machine using fuzzy-logic control: from design to implementation”, *International Journal of Production Research*, Vol. 43, N° 21, pp.4509–4537, 2005.
- [Zadeh, 1965] Zadeh L.A., “Fuzzy sets”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [Zhang and Phillis, 1999] Zhang R. and Phillis Y.A., “Fuzzy control of queuing systems with heterogeneous servers”, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol. 7, N° 1, pp.17–26, 1999.
- [Zhang et al., 2005] Zhang, R., Phillis, Y.A., and Kouikoglou, V.S. “Fuzzy control of queuing systems”, Springer, London, 2005.
- [Zimmermann and Zysno, 1980] Zimmermann H.-J. and Zysno P., “Latent connectives in human decision making”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 4, pp. 37–51, 1980.
- [Zimmern, 1956] Zimmern B., “Etude de la propagation des arrêts aléatoires dans les chaînes de production”, *Revue de Statistique Appl.*, Vol. 4, pp. 85–104, 1956.
-

ANNEXES

Annexe A :

Estimation des taux de rupture et de blocage d'un module de transformation

Soit un module de transformation $MP(i)$ en interaction avec un module placé en amont $MP(l)$ et un module placé en aval $MP(j)$ (Cf. Figure A.1). Lorsqu'une panne surgit sur le module $MP(i)$ et si son temps de réparation est relativement long, une situation de rupture apparaît en aval sur le module $MP(j)$, tandis que le module en amont $MP(l)$ subit un blocage. Ces situations de rupture et de blocage se propagent respectivement en aval et en amont de toute la ligne de transformation. Ainsi, l'estimation des taux de rupture et de blocage s'effectue en considérant pour chaque module de transformation toutes ses parties amont et aval de l'ensemble de la ligne.

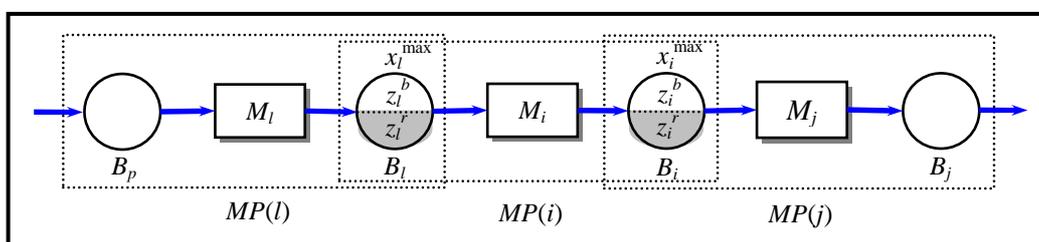


Figure A.1 : Ligne transformation.

Considérons les notations suivantes pour $\nu \in \{i, j, l\}$, en plus de celles déjà utilisées (Cf. Chapitre 2, §7.4.1) :

- $T_\nu = 1/\lambda_\nu + 1/\mu_\nu$: la durée moyenne d'un cycle de panne du module $MP(\nu)$.
- $T_\nu^r = F_\nu^r/\lambda_\nu$: la durée de rupture du module $MP(\nu)$ sur une période T_ν .
- $T_\nu^b = F_\nu^b/\lambda_\nu$: la durée de blocage du module $MP(\nu)$ sur une période T_ν .
- $\Gamma_\nu^r = F_\nu^r/\lambda_\nu + 1/\mu_\nu$: le temps durant lequel le module $MP(\nu)$ est soit en rupture soit en panne.
- $\Gamma_\nu^b = F_\nu^b/\lambda_\nu + 1/\mu_\nu$: le temps durant lequel le module $MP(\nu)$ est soit en blocage soit en panne.

1. Taux de rupture d'un module de transformation

Le taux de rupture du module de transformation $MP(i)$ est estimé par rapport au temps moyen d'un cycle de panne T_l du module en amont $MP(l)$ (Cf. Figure A.1). En effet, $MP(i)$ peut être en rupture lorsque le module en amont $MP(l)$ est soit en panne soit en rupture.

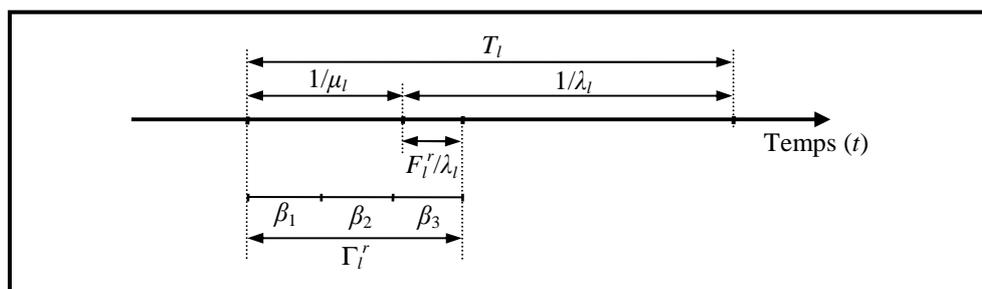


Figure A.2 : Période de rupture possible sur un cycle de panne du module $MP(l)$.

Le temps Γ_i^r durant lequel le module $MP(i)$ est soit en panne soit en rupture sur un cycle de panne T_i se décompose en trois parties comme illustré sur le Figure A.2. Soit :

$$\Gamma_i^r = \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{F_i^r}{\lambda_i} \right) = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \quad (\text{A.1})$$

où :

- β_1 représente le temps durant lequel le module $MP(i)$ est soit en panne soit bloqué sur la période Γ_i^r :

$$\beta_1 = \Gamma_i^r \cdot (\Gamma_i^b / T_i) \quad (\text{A.2})$$

- β_2 désigne la durée pendant laquelle le module $MP(i)$ est en production sur la période Γ_i^r . Dans ce cas, c'est la marge de sécurité z_i^r du stock d'entrée du module $MP(i)$ qui maintient sa production. Suivant l'objectif du contrôle local, la production cumulée du module $MP(i)$ doit être égale, en moyenne, à la demande cumulée durant un cycle de panne T_i du module $MP(i)$. D'où alors :

$$\beta_2 = z_i^r / \bar{u}_i \quad \text{où : } \bar{u}_i = \frac{d \cdot T_i}{\lambda_i^{-1} - T_i^r - T_i^b} \quad (\text{A.3})$$

avec \bar{u}_i le taux de production moyen du module $MP(i)$ et d le taux de demande.

- β_3 est le temps durant lequel le module $MP(i)$ est en rupture sur la période Γ_i^r . Comme le module $MP(i)$ ne peut pas être en rupture durant la période de fonctionnement du module amont $MP(i)$, β_3 est estimée comme suit :

$$\beta_3 = T_i^r \cdot (T_i / T_i) \quad (\text{A.4})$$

En substituant (A.2), (A.3) et (A.4) dans (A.1), nous obtenons l'estimation du taux de rupture du module $MP(i)$ comme suit :

$$F_i^r = \frac{(1 - F_i^b)(\Gamma_i^r - z_i^r / d)}{(T_i - z_i^r / d)} \quad (\text{A.5})$$

2. Taux de blocage d'un module de transformation

De la même manière que précédemment, le taux de blocage du module $MP(i)$ est estimé par rapport au temps moyen d'un cycle de panne T_j du module immédiatement en aval $MP(j)$ (Cf. Figure A.1). En effet, le module $MP(i)$ est bloqué si le module en aval $MP(j)$ est soit en panne soit bloqué. En considérant la capacité restante z_i^b du stock B_i à l'instant où le module $MP(j)$ tombe en panne, le taux de blocage F_i^b du module $MP(i)$ s'exprime par :

$$F_i^b = \frac{(1 - F_i^r)(\Gamma_j^b - z_j^b / d)}{(T_j - z_j^b / d)} \quad (\text{A.6})$$

Annexe B : Estimation du taux de perte en surplus

L'estimation des pertes en surplus Δ_i du module $MP(i)$ se décompose en trois parties relatives aux pannes, rupture et blocage. Soit alors :

$$\Delta_i = \delta_i^p + \delta_i^r + \delta_i^b \quad (\text{B.1})$$

δ_i^p est le taux de perte en surplus dû à une panne sur un cycle de fonctionnement du module $MP(i)$. La zone grisée sur la Figure B.1 représente la perte en surplus lors d'une panne. Sa surface s'obtient selon la relation suivante :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2 d + \frac{1}{2} \left(dt_c + \frac{d}{\mu_i} \right) t_c - \frac{1}{2} dt_c^2 \quad (\text{B.2})$$

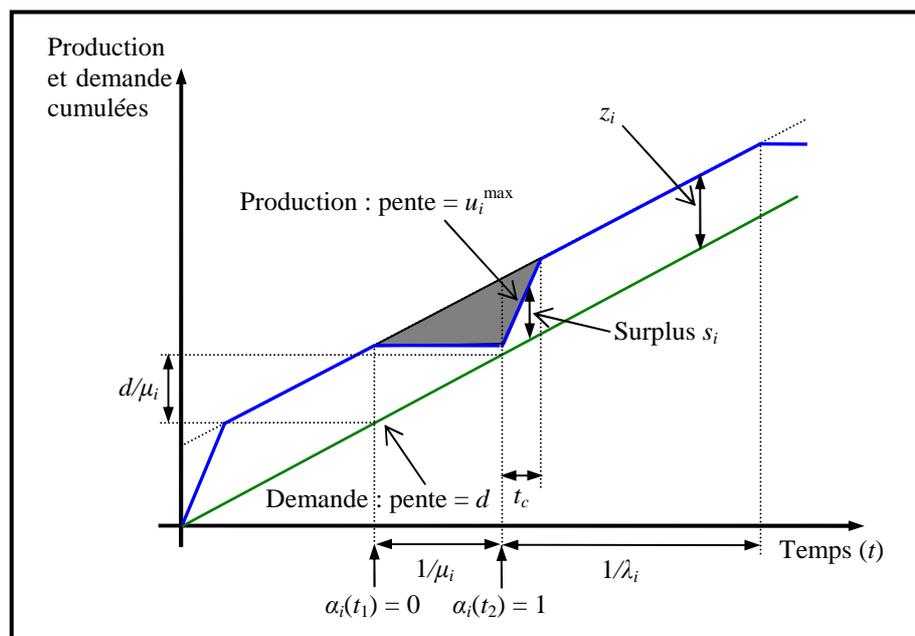


Figure B.1 : Perte en surplus due à une panne.

où t_c représente le temps nécessaire pour atteindre à nouveau le niveau de sécurité du surplus à la fin d'une panne. Il est donné comme suit :

$$t_c = \frac{d}{\mu_i (u_i^{\max} - d)} \quad (\text{B.3})$$

Dans ce cas, le module produit à une cadence supplémentaire de $(u_i^{\max} - d)$. Le taux δ_i^p peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$\delta_i^p = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2 d + \frac{1}{2} \left(dt_c + \frac{d}{\mu_i} \right) t_c - \frac{1}{2} dt_c^2}{\left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\lambda_i} \right)} \quad (\text{B.4})$$

Soit :

$$\delta_i^p = \frac{\mu_i \lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \frac{d}{2} \left(\frac{u_i^{\max}}{u_i^{\max} - d} \right) \left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2 \quad (\text{B.5})$$

En suivant le même raisonnement, nous obtenons les taux de perte en surplus δ_i^r et δ_i^b dus respectivement à la rupture et au blocage du module $MP(i)$. Soit :

$$\delta_i^r = \frac{\mu_i \lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \frac{d}{2} \left(\frac{u_i^{\max}}{u_i^{\max} - d} \right) \left(\frac{F_i^r}{\lambda_i} \right)^2, \quad \delta_i^b = \frac{\mu_i \lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} \frac{d}{2} \left(\frac{u_i^{\max}}{u_i^{\max} - d} \right) \left(\frac{F_i^b}{\lambda_i} \right)^2 \quad (\text{B.6})$$

D'où finalement, le taux total de perte en surplus du module $MP(i)$ donné par la relation suivante [Bai and Gershwin, 1995] :

$$\Delta_i = \frac{\lambda_i \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{d}{2} \left(\frac{u_i^{\max}}{u_i^{\max} - d} \right) \left[\left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2 + \left(\frac{F_i^r}{\lambda_i} \right)^2 + \left(\frac{F_i^b}{\lambda_i} \right)^2 \right] \quad (\text{B.7})$$

Développement d'une méthodologie de pilotage intelligent par régulation de flux adaptée aux systèmes de production

Karim TAMANI

Résumé :

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la conception d'une méthodologie de pilotage intelligent pour les systèmes de production à forte densité de flux. Les caractéristiques de ces systèmes nous permettent d'appréhender la représentation des flux y circulant par un modèle continu. Ainsi, à partir du modèle obtenu, la méthodologie de pilotage proposée vise à améliorer les performances du système de production en présence de diverses perturbations. Dans ce contexte, en considérant une décomposition du système en modules de production élémentaires, nous avons proposé une structure de pilotage distribuée et supervisée à deux niveaux :

- Un niveau de « commande locale » ayant pour objectif de réguler les flux traversant chaque module de production sur la base des informations locales (surplus, niveaux des stocks),
- Un niveau de « supervision » dédié à la coordination des contrôleurs locaux afin de suivre les objectifs globaux.

Au niveau de la commande locale, nous avons opté pour une structure distribuée et adopté une approche de pilotage fondée sur le principe du surplus. Ce principe consiste à allouer de la capacité en ajustant le taux de production de chaque module afin de satisfaire les demandes tout en évitant les ruptures et les blocages. Compte tenu des difficultés liées aux formalismes analytiques et aux incertitudes du système et son environnement, nous avons utilisé des techniques à base d'expertise en exploitant les systèmes flous de Takagi-Sugeno.

Au niveau de la commande globale, la supervision est introduite afin d'améliorer la réactivité de la commande locale ainsi que les performances du système en intégrant les objectifs globaux via un mécanisme capable de réaliser des compromis entre des objectifs antagonistes. Lorsqu'une dérive est constatée, l'action de supervision est déployée sous forme d'une composante additive. La fonction de supervision est formalisée en exploitant des mécanismes d'agrégation à base de règles floues et d'opérateurs d'agrégation. Les superviseurs développés se distinguent par : la représentation des objectifs par des intervalles conventionnels et flous, le formalisme d'agrégation utilisé et les informations agrégées. Enfin, la méthodologie proposée a été validée, par simulation continue, sur des systèmes de production complexes et à gros volume.

Mots-clés : simulation, systèmes de production, contrôle flou, supervision, opérateurs d'agrégation.

Abstract:

This thesis deals with development of an intelligent flow control approach applied to the field of high-volume production systems. In this context, the flow of parts is approximated by a continuous-flow (fluid) model. Thus, based on the obtained model, the proposed methodology aims at improving the performance of the overall system in presence of disturbances. In this context, based on the decomposition of a production system into basic modules, a two-level control architecture is proposed:

- A local control level for regulating the material flows at each basic production module on the basis of local information (surplus and buffer levels).
- A supervisory control level for coordinating the lower level distributed controllers and tracking the global objectives.

Firstly, at the local control level, the surplus-based approach is adopted to regulate the flow into each production module. The control policy allocates the needed capacity by adjusting the processing rates in order to satisfy the demand and eliminate machine starvation or blocking. In this case, the local control structure is distributed. Due to the limitation of the existing analytical surplus-based approaches and the presence of uncertainties, the local controller is designed on the basis of expert knowledge according to the Takagi-Sugeno fuzzy formalisms.

Next, the supervision level is introduced in order to enhance the reactivity of the local control and improve the overall production-system performances by integrating the global objectives through a decisional mechanism able to deal with conflicting situations. The supervisory control action is deployed as an additive component when a degraded operating mode is detected. In this context, the function of the supervisor is formalized by using aggregation mechanisms based on the fuzzy rules and the aggregation operators. The developed supervisors differ by: the interval representation of the objectives (conventional and fuzzy), the aggregation mechanisms and the aggregated information. Lastly, simulation results through a continuous-flow simulator on some complex production systems of high-volume are presented to illustrate the feasibility of the proposed methodology.

Key words: simulation, production system, fuzzy control, supervisory control, aggregation operators.