

## APPROCHE DE PILOTAGE PAR ALLOCATION DE CAPACITE UTILISANT UN MODELE DE SIMULATION A FLUX CONTINU

K. TAMANI, R. BOUKEZZOULA

LISTIC Polytech'Savoie  
Domaine Universitaire – BP 80439  
74944 Annecy-le-Vieux cedex France  
Karim.Tamani@univ-savoie.fr,  
Reda.Boukezzoula@univ-savoie.fr

G. HABCHI

SYMME Polytech'Savoie  
Domaine Universitaire – BP 80439  
74944 Annecy-le-Vieux cedex France  
Georges.Habchi@univ-savoie.fr

**RESUME :** *L'intégration d'une méthodologie de pilotage dans la simulation a motivé plusieurs travaux de recherche afin de rendre cette dernière « active » (Habchi et Berchet, 2003). Dans cet article, nous proposons une approche de simulation contrôlée à flux continu où le flux de production dans le système est régulé. En effet, en s'appuyant sur une modélisation fluide du système manufacturier, une architecture de pilotage hiérarchique à deux niveaux (niveau bas : commande locale et niveau haut : supervision) est développée. Sachant que le système de production est vue comme une collections de sous-systèmes élémentaires (machines, stocks), la commande dite « bas niveau », fondée sur la théorie du contrôle flou, vise à réguler le flux de production au niveau de chaque ressource élémentaire. Dans ce contexte, afin de coordonner les actions de contrôle locales et améliorer les performances globales, une stratégie de supervision est proposée. Les principes de modélisation et de pilotage pour la simulation sont présentés et illustrés par une application.*

**MOTS-CLES :** *simulation à flux continu, modèle fluide, contrôle flou, opérateur d'agrégation, superviseur.*

### 1. INTRODUCTION

Dans l'étude des systèmes de production, certaines particularités concernant la fabrication des produits peuvent être prises en compte, et mieux encore, utilisées pour améliorer, voire simplifier, le problème de représentation et d'analyse de ces systèmes. Certaines industries du papier, de l'agro-alimentaire, des semi-conducteurs et d'autres fabriquent quotidiennement des quantités importantes de produits. Les caractéristiques de ces systèmes de production « *gros volumes* » font que leurs entrées et sorties peuvent être facilement considérées comme continues. Dans ce cas, le flux de produits est approximé par un modèle continu dit « fluide » (Kouikoglou et Phillis, 1997a ; Suri et Fu, 1994).

La modélisation fluide présente un certain nombre d'avantages qui peuvent être résumés comme suit (Balduzzi *et al.*, 2001) :

- elle permet une augmentation considérable de l'efficacité du calcul, étant donné que le modèle fluide de simulation est souvent plus rapide et plus précis (Kouikoglou et Phillis, 1997b),
- elle tient compte des contraintes de capacité des ressources du système manufacturier en considérant leurs taux de production,
- elle offre une simplicité de synthèse de contrôle optimal qui ne peut être obtenue par une modélisation à flux discrets (Gershwin, 2000),

- elle fournit une formulation agrégée permettant de réduire considérablement la taille de l'espace d'état (Balduzzi et Menga, 1998),
- elle considère les paramètres du système continu (capacités et niveaux des stocks par exemple) ce qui permet d'utiliser implicitement l'information du gradient dans des phases d'optimisation et d'analyse de sensibilité du système (Xie, 2002).

Dans cette article, nous privilégions l'utilisation de modèle fluide afin d'assurer une représentation qui permet le développement d'une stratégie de pilotage pour maîtriser les flux de production dans un processus de simulation. Cette dernière est structurée en hiérarchie à deux niveaux. Au niveau du système physique, le contrôle est distribué sur les différents modules de production élémentaires issus de la décomposition du système. Cette décomposition a pour avantages d'accroître la flexibilité du contrôle ainsi que sa tolérance aux fautes. Le module de production contrôlé constitue alors l'entité de pilotage élémentaire dans le modèle de simulation à flux continu.

Cependant, cette architecture ne peut assurer le respect des objectifs globaux en raison notamment de la « *myopie* » naturelle des entités de pilotage locales. C'est pourquoi nous proposons d'augmenter la structure de pilotage avec un niveau de supervision. Ce dernier a pour objectif de maintenir un comportement global performant et cohérent. Ce mécanisme doit alors tenir compte à la fois des informations locales et globales

dans l'élaboration de l'action finale. Pour cela, nous nous basons sur la notion d'allocation de capacité de production. En effet, dans un premier temps, le superviseur évalue, à partir de ses indicateurs de performance, la satisfaction des objectifs de la production, et décide ensuite de modifier l'action locale afin d'améliorer les performances globales spécifiées par l'utilisateur.

Tout d'abord, nous présentons la problématique du pilotage des flux d'un système de production complexe. Puis nous détaillons notre modélisation fluide. Nous présentons ensuite dans la section 4 la structure de contrôle locale, et dans la section 5 la structure du superviseur. La section 6 est consacrée à l'illustration de notre approche de pilotage sur un modèle de simulation à flux continu d'un système de production à semi-conducteurs. Enfin, nous concluons.

## 2. HYPOTHESES ET POSITIONNEMENT DU PROBLEME

Considérons un système de production composé de  $N$  machines et  $M$  stocks intermédiaires, produisant  $J$  type de produits différents, dont le taux de demande est supposé connu et constant pour chaque type de produit.

On définit par  $Q(i)$  l'ensemble des produits de type différent que la machine  $M_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) peut traiter, avec  $Card(Q(i))=J_i \leq J$  est le cardinal de l'ensemble  $Q(i)$ . Chaque produit de type  $j$  ( $j \in Q(i)$ ) requière  $k$  ( $k=1, \dots, K_{ij}$ ) différentes opérations sur la machine  $M_i$ . Cela suppose qu'un type de produit peut être traité  $K_{ij}$  fois sur la même machine (cas de systèmes avec réentrance ou à flux cycliques). De la même manière, nous considérons  $B_{ijk}$  le stock de sortie du produit de type  $j$  à la fin de l'opération  $k$  sur la machine  $M_i$ . Soient alors  $B_+(i)$  et  $B_-(i)$  respectivement les ensembles des stocks d'entrée et de sortie de la machine  $M_i$ . Dans ce cadre, on définit un module de production élémentaire relatif à la machine  $M_i$  par l'ensemble  $MP(i)=\{M_i, B_+(i), B_-(i)\}$ .

D'une manière générale, le système de production peut-être vue comme l'interconnexion d'un ensemble de modules de production élémentaires selon le processus de fabrication.

Par ailleurs, nous émettons les hypothèses suivantes :

- le taux de demande, supposé constant, désigne le nombre de pièces commandées par unité de temps,
- les machines sont sujettes à des pannes aléatoires (une panne ne peut survenir que pendant la période de production de la machine),
- les taux de panne et de réparation de chaque machine sont stochastiques et suivent des distributions exponentielles,
- les temps opératoires sont déterministes,
- 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 de routage de chaque type de produit est fixe et spécifiée.

## 3. MODELE FLUIDE POUR UN MODULE DE PRODUCTION MULTI-PRODUIT

Soit un module de production élémentaire  $MP(i)$  capable de produire  $J_i$  produit de type différent  $j$ , avec  $j \in Q(i)$ . Dans toute la suite, nous considérons une formulation à temps discret où  $t_n$  désigne l'instant de discrétisation (Sharifnia, 1994).

Afin de définir la capacité de production allouée à la machine  $M_i$  pour l'opération  $k$  ( $k=1, \dots, K_{ij}$ ) d'un type de produit  $j$ , nous supposons que la machine est « virtuellement » divisée en autant de sous-machines que d'opérations par produit. Dans ce cas, la machine multi-produit  $M_i$  est décomposée en  $\sum_{\{j|\forall j \in Q(i)\}} K_{ij}$  sous-machines mono-produit  $m_{ijk}$  (représentée en pointillés sur la Figure 1). Dans ce cas,  $B_{ijk}$  est le stock à la sortie de la sous-machine  $m_{ijk}$  supposé de capacité finie  $x_{ijk}^{\max}$ . En s'appuyant sur la représentation précédemment décrite, la sous-machine  $m_{ijk}$  et l'ensemble de ses stocks adjacents  $B_+(ijk)$  et  $B_-(ijk)$  représentent le sous-module de production élémentaire  $mp(ijk)$  de l'opération  $k$  du produit type  $j$  sur la machine  $M_i$ .

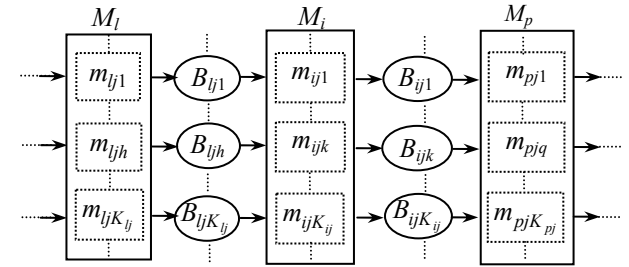


Figure 1. Décomposition d'une machine multi-produit en sous-machines mono-produit.

La production cumulée  $y_{ijk}$  de la sous-machine  $m_{ijk}$  à chaque instant est donnée par :

$$y_{ijk}(t_{n+1}) = y_{ijk}(t_n) + u_{ijk}(t_n) \delta t_n \quad (1)$$

où:  $\delta t_n = t_{n+1} - t_n$  et  $u_{ijk}$  est le taux de production de  $m_{ijk}$  (entrée du système). Les informations locales à chaque sous-module de production élémentaire comprennent :

- le niveau des stocks en amont et en aval de  $m_{ijk}$ ,
- la valeur du surplus.

Le niveau d'un stock est donné par la différence entre les flux entrant et sortant. Soit, pour le stock  $B_{ijk}$  reliant la sous-machine amont  $m_{ijk}$  à la sous-machine aval  $m_{pjq}$  (voir Figure 1), sa dynamique s'exprime comme suit :

$$x_{ijk}(t_{n+1}) = x_{ijk}(t_n) + [u_{ijk}(t_n) - u_{pjq}(t_n)] \delta t_n \quad (2)$$

avec possibilité que  $p=i$  et  $q=k+1$  dans le cas de réentrance, i.e., l'opération suivante de la gamme du produit type  $j$  est exécutée sur la même machine.

Le niveau du stock est contraint par sa capacité maximale :

$$0 \leq x_{ijk}(t_n) \leq x_{ijk}^{\max}. \quad (3)$$

Le niveau du surplus de  $m_{ijk}$  est défini comme suit :

$$s_{ijk}(t_{n+1}) = s_{ijk}(t_n) + [u_{ijk}(t_n) - d_j] \delta t_n. \quad (4)$$

où  $d_j$  le taux de demande du produit type  $j$ .

On définit alors une variable d'indice d'opération  $\theta_{ijk}$ , telle que :  $\theta_{ijk}=0$  si  $m_{ijk}$  exécute la dernière opération de la gamme du produit  $j$  ; sinon  $\theta_{ijk}=1$ . Par conséquent :

- si  $\theta_{ijk}=0$ , la valeur de  $s_{ijk}(t_n)$  représente le *surplus final* du système. Dans ce cas, si cette valeur est positive, elle représente un surplus du stock des produits finis, et si elle est négative, cela dénote un retard sur la production désirée (demande). L'objectif étant de maintenir le surplus final proche de zéro.
- si  $\theta_{ijk}=1$ , la valeur de  $s_{ijk}(t_n)$  définit le *surplus local*. Elle représente la différence à chaque instant entre la production cumulée à la fin de la  $k^{\text{ème}}$  opération du produit de type  $j$  sur la machine  $M_i$ , et la demande cumulée évaluée localement jusqu'à cet instant. Le surplus local permet de remonter l'information de l'aval vers l'amont de chaque étage de production (Gershwin, 2000).

Le taux de production  $u_{ijk}$  de chaque sous-machine  $m_{ijk}$  est en fonction du taux de production maximal  $u_{ijk}^{\max}$ . Ce dernier est donné par l'expression suivante :

$$u_{ijk}^{\max} = \left( \frac{d_j \tau_{ijk}}{\sum_{\{j|\forall j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk}} \right) \left( \frac{1}{\tau_{ijk}} \right). \quad (5)$$

avec  $\tau_{ijk}$  le temps opératoire de l'opération  $k$  du produit de type  $j$  sur  $m_{ijk}$ .

Dans (5),  $d_j \tau_{ijk}$  représente la capacité nécessaire pour satisfaire la demande du produit de type  $j$ . La somme

$\sum_{\{j|\forall j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk}$  est la capacité totale nécessaire à la machine  $M_i$  pour que toutes les demandes soient satisfaites. Cette somme doit être inférieure ou égale à la disponibilité de la machine  $M_i$ . Soit :

$$\sum_{\{j|\forall j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk} \leq e_i, i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

avec :

$$e_i = \left( \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \right). \quad (7)$$

est la disponibilité intrinsèque de la machine  $M_i$  prise en isolation estimée par rapport à son taux de panne  $\lambda_i$  et de réparation  $\mu_i$ . Dans ce cas, le temps moyen durant lequel la machine  $M_i$  est alternativement opérationnelle puis défaillante est donné par  $T_i=1/\lambda_i+1/\mu_i$ .

La disponibilité d'une machine est en fonction de son état. On définit alors l'état de  $M_i$  par une variable binaire  $\alpha_i(t_n)$  telle que :  $\alpha_i(t_n)=0$  si  $M_i$  est en panne et  $\alpha_i(t_n)=1$  si elle est opérationnelle. Sachant que l'état de la sous-machine  $m_{ijk}$  est donné par celui de la machine  $M_i$ , dans ce cas la contrainte de capacité de  $m_{ijk}$  par rapport à son taux de production  $u_{ijk}$  est exprimée comme suit :

$$\text{si } \alpha_i(t_n) = 0, \quad u_{ijk}(t_n) = 0.$$

$$\text{si } \alpha_i(t_n) = 1, \quad \sum_{\{j|\forall j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} u_{ijk}(t_n) \tau_{ijk} \leq 1; u_{ijk}(t_n) \geq 0. \quad (8)$$

Cette contrainte signifie que la machine  $M_i$  ne peut fonctionner plus de 100% de son temps.

#### 4 ARCHITECTURE DE CONTROLE DISTRIBUEE

Dans cette partie, nous détaillons la vue locale de l'architecture de contrôle. L'objectif visé est la maîtrise des flux au niveau de chaque module de production élémentaire à l'aide d'indicateurs de performance locaux afin d'éviter les phénomènes de rupture/blocage, qui sont à l'origine de la propagation de perturbations. Pour cela, étant donné la nature de la production, nous adoptons un contrôle flou via une modélisation par approximation continue des flux décrite précédemment. Ce choix est motivé par la complexité et le grand nombre de paramètres à prendre en considération dans la synthèse du contrôleur local. Aussi, par l'approximation continue des flux, il est possible d'appliquer les concepts issus de l'automatique conventionnelle des systèmes continus, tels que la théorie du contrôle flou. Dans ce cas, afin de maintenir une production proche de la demande, la loi de commande consiste à allouer la capacité de production adéquate pour chaque opération pour un type de produit en tenant compte des contraintes de capacité de la ressource (8).

##### 4.1 Synthèse d'un contrôleur local

Dans le paragraphe précédent, nous avons donné les relations qui régissent la dynamique des flux traversant un module de production élémentaire. Afin de réguler les flux au niveau d'un module de production, un contrôleur flou est synthétisé pour chaque opération d'un type de produit. En adoptant la décomposition décrite précédemment, la synthèse du contrôleur flou pour le module de production élémentaire se ramène alors à la synthèse d'un sous-contrôleur pour chaque sous-module mono-produit.

Afin d'illustrer la synthèse du contrôleur flou, nous considérons le cas d'un sous-module de transformation constitué d'une sous-machine  $m_{ijk}$ , de son stock amont  $B_{ijh}$  et de son stock aval  $B_{ijk}$ , noté  $mt(ijk)=\{m_{ijk}, B_{ijh}, B_{ijk}\}$ , comme illustré sur la Figure 1 (i.e.,  $Card(B_+(ijk)) = Card(B_-(ijk))=1$ ).

A partir des informations locales  $(\alpha_i, \mathbf{x}_{ijk}, s_{ijk}, t_n)$ , avec  $\mathbf{x}_{ijk}=[x_{ijh}, x_{ijk}]^T$  est le vecteur des niveaux des stocks d'entrée et de sortie, le contrôleur a pour objectif de suivre, de plus près, une production de référence (demande) tout en maintenant un taux d'utilisation de la machine satisfaisant en éliminant (ou du moins réduire) les périodes de blocage et de rupture. C'est un problème similaire au problème de poursuite de trajectoire en automatique conventionnelle (Figure 2).

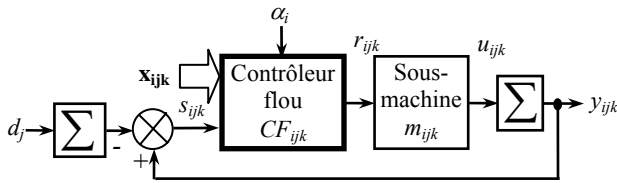


Figure 2. Schéma bloc du sous-module contrôlé.

Sur la Figure 2, la variable  $r_{ijk}(t_n) \in [0, 1]$  représente la commande générée par le contrôleur flou  $CF_{ijk}$ .

Les objectifs de pilotage sont appréhendés en synthétisant une loi de commande capable de réguler le taux de production (allouer la capacité de production appropriée) pour chaque opération d'un type de produit donné, sur la base des observations suivantes :

- Si le niveau du surplus est satisfaisant, alors allouer la capacité de production appropriée de façon à éliminer ou à anticiper les phénomènes de rupture (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 avec un taux maximum de production ou arrêter la production.

Le contrôle tel que décrit par ces observations est basé sur la notion du surplus (Gershwin, 1994, 2000). Dans ce cas, S. B. Gershwin propose une politique de contrôle optimale dénommée : *hedging point policy*, littéralement politique du point d'hésitation. Elle se résume comme suit :

- Si le niveau du surplus est en dessous du point d'hésitation, alors produire au maximum de capacité disponible.
- Si le niveau du surplus atteint le point d'hésitation, alors produire à un taux égal au taux de la demande.
- Si le niveau du surplus est au dessus du point d'hésitation, alors arrêter la production.

Formellement, pour le module de transformation de  $m_{ijk}$ , la politique par point d'hésitation s'exprime comme suit :

$$u_{ijk}^*(t_n) = \begin{cases} u_{ijk}^{\max}, & \text{si } s_{ijk}(t_n) < z_{ijk} \text{ et } \alpha_i(t_n) = 1 \\ d_j, & \text{si } s_{ijk}(t_n) = z_{ijk} \text{ et } \alpha_i(t_n) = 1. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

Avec  $z_{ijk}$  est la valeur du point d'hésitation qui représente la marge de sécurité du surplus, et  $u_{ijk}^*(t_n)$  est le taux de production optimal de  $m_{ijk}$ .

Cependant, la preuve d'optimalité est établie pour le cas simple mono-produit à une ou deux machines, et il a été montré qu'une généralisation analytique au cas multi-produit, multi-machine est difficile (Perkins et Srikant, 1997).

De ce fait, des heuristiques sont proposées afin d'approximer la solution optimale (Bai et Gershwin, 1994, 1995 ; Tsouveloudis *et al.*, 2000 ; Ioannidis *et al.*, 2004). Dans ce contexte, Bai et Gershwin (Bai et Gershwin, 1994, 1995) développent une heuristique pour ordonnancer les flux dans un système à *flow-shop* mono-

produit (Bai et Gershwin, 1995) et multi-produit (Bai et Gershwin, 1994) en résolvant le problème par programmation linéaire sous contraintes qui optimise les taux de production. Ils proposent un partitionnement de l'espace d'état en domaines attractifs mutuellement exclusifs. Dans chaque domaine, le taux de production est constant. Les commutations ont lieu à l'intersection des domaines d'attraction qui définissent les valeurs des points d'hésitations. Néanmoins, ces commutations « *franches* » conduisent à un effet de pompage (*chattering*) au voisinage du point d'hésitation (*hedging point*) affectant considérablement les performances du contrôle (Gershwin, 1994).

Dans notre démarche, nous proposons de pondérer le signal de commande appliqué à la sous-machine afin d'avoir des transitions moins « *brutales* ». Pour cela, nous utilisons un système flou de Takagi-Sugeno à conclusions constantes (Takagi et Sugeno, 1985) pour décrire le comportement entrée-sortie désiré du contrôleur flou d'une sous-machine.

Dans la conception du contrôleur flou, une étape importante est le choix de la forme des ensembles flous, leur nombre, leur signification ainsi que la base de règles. On se base ici sur l'expertise et sur l'analyse du comportement souhaité du module de production élémentaire pour la détermination des règles floues du contrôle.

#### 4.1.1 Choix des ensembles flous

Pour pouvoir exploiter les informations issues du sous-module de transformation  $mt(ijk)$ , sur la base des observations citées précédemment, une étape de *fuzzification* est alors nécessaire. Un partitionnement des univers de discours en sous-ensembles flous décrivant l'état de  $mt(ijk)$  est alors effectué.

En effet, selon le niveau d'un stock, son état peut être : *Vide*, *Partiellement Vide*, *Normal*, *Partiellement Saturé* ou *Saturé*. Ces états se traduisent par des termes linguistiques dont chacun représente le sous-ensemble de valeurs numériques caractérisant la variable linguistique du niveau du stock. Cinq sous-ensembles flous sont alors utilisés pour décrire l'état des stocks, tel que :  $X_{ijk} = \{X_{ijk}^1, X_{ijk}^2, X_{ijk}^3, X_{ijk}^4, X_{ijk}^5\}$  est l'ensemble des termes linguistiques (symboles flous) de la variable d'entrée  $x_{ijk}$  du niveau du stock  $B_{ijk}$  (Figure 3 (a)). Il en est de même pour l'ensemble  $X_{ljk}$  de la variable  $x_{ljk}$  du stock  $B_{ljk}$ .

La variable du surplus définit la différence entre la production cumulée et la demande cumulée. Selon qu'elle soit négative ou positive, elle décrit respectivement un retard (*backlog*) ou un excès (*surplus*) de production. Trois sous-ensembles flous *Négatif*, *Zéro* et *Positif* sont utilisés pour décrire l'état du surplus, tel que :  $S_{ijk} = \{S_{ijk}^1, S_{ijk}^2, S_{ijk}^3\}$  est l'ensemble des termes linguistiques de la variable  $s_{ijk}$  (Figure 3 (b)). Le terme linguistique *Zéro* représente l'ensemble des valeurs numériques autour du niveau du surplus souhaité (la valeur du point d'hésitation).

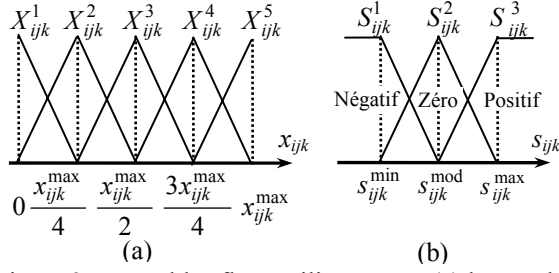


Figure 3. Ensembles flous utilisés pour : (a) les stocks, (b) le surplus.

L'action de la variable de contrôle  $r_{ijk}$  consiste donc à réguler le taux de production  $u_{ijk}$  de  $m_{ijk}$  afin d'éviter une accumulation des flux en entrée et en sortie. Elle consiste à pondérer le taux de production maximal de  $m_{ijk}$  selon la relation suivante :

$$u_{ijk}(t_n) = r_{ijk}(t_n)u_{ijk}^{\max} \quad (10)$$

Ainsi, suivant l'état des stocks et du surplus, le taux de production peut être : *Maximum*, *Rapide*, *Moyen*, *Lent* ou *Nul*. Ces termes peuvent être interprétés par des poids constants par rapport au taux de production maximal comme suit : 1 (production à 100% de capacité), 0.75 (75%), 0.5 (50%), 0.25 (25%) et 0 (arrêt de production).

#### 4.1.2 Représentation du contrôleur

Formellement, la représentation entrée-sortie du contrôleur est donnée par un système flou de Takagi-Sugeno à conclusion constante. En effet, s'agissant de pondérer le taux de production maximal de  $m_{ijk}$ , la sortie finale  $r_{ijk}$  générée par le système flou de Takagi-Sugeno est obtenue par la moyenne pondérée des conclusions.

Le contrôleur flou de  $mt(ijk)$  est alors représenté par la collection de règles de la forme suivante :

$$R_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)} : \text{ Si } x_{ijh} \text{ est } X_{ijh}^{i_1} \text{ et } x_{ijk} \text{ est } X_{ijk}^{i_2} \text{ et } s_{ijk} \text{ est } S_{ijk}^{i_3} \\ \text{ Alors } r_{ijk} = \phi_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)}.$$

Avec :

- $x_{ijh}$  et  $x_{ijk}$  sont respectivement les niveaux des stocks en amont  $B_{ijh}$  et en aval  $B_{ijk}$ , et  $s_{ijk}$  le niveau du surplus local.
- $X_{ijh}^{i_1}$ ,  $X_{ijk}^{i_2}$  et  $S_{ijk}^{i_3}$  correspondent respectivement au  $i_l$ ème ( $l=1, 2, 3$ ) terme linguistique associé aux variables d'entrées  $x_{ijh}$ ,  $x_{ijk}$  et  $s_{ijk}$ .
- $\phi_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)} \in [0, 1]$  est le poids dans la conclusion de la règle indexée  $(i_1, i_2, i_3)$ .

Si  $N_l$  symboles flous décrivent l'entrée  $e_l$  ( $l=1, 2, 3$ ) avec  $e_1=x_{ijh}$ ,  $e_2=x_{ijk}$  et  $e_3=s_{ijk}$ , alors  $i_l \in I_l = \{1, \dots, N_l\}$ . La base de règles complète est alors composée de  $N = \prod_{l=1}^3 N_l$  règles. Dans ce cas, l'ensemble des indices représentant la base de règles est  $I_1 \times I_2 \times I_3 = I$ .

Pour le partitionnement des univers de discours illustré sur la Figure 3,  $i_l \in I_l = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  pour  $l=1, 2$ ; et  $i_3 \in I_3 = \{1, 2, 3\}$ , la base de règles complète est alors composée de  $N=5 \times 5 \times 3=75$  règles.

La sortie générée par le contrôleur flou  $r_{ijk} \in [0, 1]$  est donnée par :

$$r_{ijk}(t_n) = \begin{cases} 0 & \text{si } \alpha_i(t_n) = 0 \\ CF_{ijk}(x_{ijh}, x_{ijk}, s_{ijk}) & \text{si } \alpha_i(t_n) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

où

$$CF_{ijk}(x_{ijh}, x_{ijk}, s_{ijk}) = \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in I} \xi_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)}(x_{ijh}, x_{ijk}, s_{ijk}) \cdot \phi_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)}$$

avec :

$$\xi_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)}(x_{ijh}, x_{ijk}, s_{ijk}) = \mu_{X_{ijh}^{i_1}}(x_{ijh}) \times \mu_{X_{ijk}^{i_2}}(x_{ijk}) \times \mu_{S_{ijk}^{i_3}}(s_{ijk})$$

représente le degré de vérité de la prémisse de la règle  $R_{ijk}^{(i_1, i_2, i_3)}$ , et  $\mu_{X_l^{i_l}}(x_l)$  est la fonction d'appartenance de la variable  $x_l$  au sous-ensemble flou  $X_l^{i_l}$ .

#### 4.1.3 Estimation des paramètres du contrôleur local

Les univers de discours des entrées du contrôleur flou, à savoir : la capacité maximale des stocks et le niveau de sécurité du surplus (la valeur du point d'hésitation), sont choisis de sorte à optimiser les performances locales.

Pour cela, nous adoptons l'heuristique développée dans (Bai et Gershwin, 1994). Les auteurs donnent une approximation de la relation entre les taux de rupture et de blocage, le niveau de sécurité du stock, les paramètres des machines et la demande. Des contraintes de rupture et de blocage sont alors formulées et un problème en programmation linéaire est établi pour estimer la capacité optimale des stocks et du surplus de sécurité. On note alors :

- $F_{ijk}^r$  : le taux de rupture de  $m_{ijk}$ .
- $F_{ijk}^b$  : le taux de blocage de  $m_{ijk}$ .
- $z_{ijk}^r$  : l'espace libre du stock de sortie  $B_{ijk}$  de  $m_{ijk}$  à l'instant où  $m_{pq}$ , exécutant l'opération suivante du produit de type  $j$ , tombe en panne (avec possibilité que  $p=i$  et  $q=k+1$ ).
- $z_{ijh}^b$  : niveau du stock d'entrée  $B_{ijh}$  de  $m_{ijk}$  à l'instant où  $m_{ijh}$ , exécutant l'opération précédente du produit de type  $j$ , tombe en panne (avec possibilité que  $l=i$  et  $h=k-1$ ).

Les taux de rupture et de blocage de  $m_{ijk}$  s'obtiennent respectivement comme suit (Bai et Gershwin, 1994) :

$$F_{ijk}^r = \frac{(1 - F_{ijk}^b) \left( \frac{1}{\mu_l} + \frac{F_{ijh}^r}{\lambda_l} - \frac{z_{ijh}^b}{d_j} \right)}{\left( \frac{1}{\mu_l} + \frac{1}{\lambda_l} - \frac{z_{ijh}^b}{d_j} \right)} \quad (12)$$

et

$$F_{ijk}^b = \frac{(1 - F_{ijk}^r) \left( \frac{1}{\mu_p} + \frac{F_{pq}^b}{\lambda_p} - \frac{z_{ijk}^r}{d_j} \right)}{\left( \frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\lambda_p} - \frac{z_{ijk}^r}{d_j} \right)} \quad (13)$$

avec les conditions :

$$F_{ijk}^r + F_{ijk}^b \leq 1 - \frac{d_j}{d_{ijk}^{\max}}, \quad d_{ijk}^{\max} = \left( \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \right) u_{ijk}^{\max}. \quad (14)$$

et vérifiant :

$$0 \leq d_j \leq \min_{\{i,k|\theta_{ijk}=1\}} \{d_{ijk}^{\max}\}, \quad j=1, \dots, J \quad (15)$$

Les capacités maximales des stocks intermédiaires sont déterminées en résolvant le problème d'optimisation suivant :

$$\min \sum_{\{i,k|\theta_{ijk}=1\}} \{z_{ijk}^r + z_{ijk}^b\}, \quad j=1, \dots, J. \quad (16)$$

sous les contraintes (11), (12), (13) et (14).

La taille maximale des stocks est alors défini par :

$$x_{ijk}^{\max} = z_{ijk}^r + z_{ijk}^b, \quad \theta_{ijk} = 1. \quad (17)$$

Le niveau de sécurité du surplus  $z_{ijk}$  (valeur du point d'hésitation) de  $m_{ijk}$  est à choisir de sorte que le surplus final moyen  $\bar{s}_{ijk}$  (pour  $\theta_{ijk}=0$ ) tend vers zéro. Cependant,

la valeur moyenne du surplus diffère de celle de  $z_{ijk}$  due aux pannes, rupture et blocage. Cette différence est approximée en fonction des taux de rupture et de blocage ainsi que les taux de panne et de réparation par la relation suivante (Bai et Gershwin, 1994) :

$$\delta_{ijk} = \frac{\lambda_i \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{d_j}{2} \left( \frac{u_{ijk}^{\max}}{u_{ijk}^{\max} - d_j} \right) \left[ \left( \frac{1}{\mu_i} \right)^2 + \left( \frac{F_{ijk}^r}{\lambda_i} \right)^2 + \left( \frac{F_{ijk}^b}{\lambda_i} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Soit alors, les niveaux de sécurité du surplus sont fixés comme suit :

$$\begin{aligned} z_{ijk} &= \delta_{ijk}, & \text{si } \theta_{ijk} &= 1 \\ z_{ijk} &= z_{ijk}^b + z_{pjq}, & \text{si } \theta_{ijk} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

avec  $m_{pjq}$  est la sous-machine exécutant l'opération suivante du produit de type  $j$  (avec possibilité que  $p=i$  et  $q=k+1$ ).

Le niveau de sécurité du surplus permet de fixer dans les bornes du fonctionnement admissibles du surplus ( $s_{ijk}^{\text{mod}}, s_{ijk}^{\text{min}}, s_{ijk}^{\text{max}}$ ) lors du partitionnement de l'univers de discours (Figure 3 (b)).

## 4.2 Architecture de contrôle flou distribué

Dans le cas général d'un système de production à  $N$  machines en interaction via des stocks, la structure globale du système est vue comme un ensemble de  $N$  modules de production élémentaires, dont chacun est piloté par un contrôleur flou selon la structure illustrée sur la Figure 2.

L'architecture de contrôle globale est alors de type multi-contrôleur, modulaire et distribuée sur chaque module de production élémentaire.

Cependant, dans ce type d'architecture, la présence de retards importants (dus aux phénomènes d'accumulation des flux) et à la vision locale d'un module de production

contrôlé (problème de « myopie ») ne permettent pas d'anticiper suffisamment les aléas de fonctionnement.

De ce fait, afin de permettre à chaque contrôleur local de disposer à tout instant d'une vue globale du système pour, d'une part anticiper l'effet d'une perturbation et d'autre part garantir la cohérence des actions effectuées avec les objectifs globaux du contrôle, la structure de contrôle locale est augmentée d'un niveau supervision.

## 5 ARCHITECTURE DE CONTROLE SUPERVISEE

La démarche de supervision que nous développons s'inspire des travaux de Ioannidis *et al.* (Ioannidis *et al.*, 2004). Ces derniers proposent une structure de supervision floue basée sur la notion du surplus décrite par S. B. Gershwin (Gershwin, 2000). Les auteurs considèrent le surplus final comme la principale information globale, et développent un mécanisme d'adaptation des bornes du fonctionnement admissibles du surplus à base de règles floues. La démarche proposée consiste à limiter le flux de produit dans le système, et donc à contrôler les lancements.

Cependant, cette démarche ne prend pas en compte la dynamique des flux interne du système du fait que le superviseur ne considère que les informations globales. De plus, l'action du superviseur consiste non pas à augmenter la commande locale, mais plutôt à modifier les paramètres des contrôleurs locaux (bornes admissibles des entrées du surplus de chaque contrôleur). Cette vision de contrôle globale ne permet pas de détecter des goulets d'étranglements par exemple et d'anticiper la propagation d'une perturbation à l'intérieur du système. Dans notre approche, nous proposons d'intégrer la commande locale, en plus des indicateurs globaux dans la synthèse du superviseur. Ce dernier est basé sur la notion d'allocation de capacité de production qui est en adéquation avec l'action locale. En effet, le superviseur dans un premier temps évalue le degré d'atteinte des objectifs de production à partir des indicateurs globaux, et décide ensuite de modifier l'action locale selon l'état de la commande générée par chaque contrôleur local.

### 5.1 Les indicateurs de performance du niveau supervision

La représentation d'un objectif est essentiellement liée à son domaine (ou intervalle) de tolérance. Ce dernier, regroupe l'ensemble des valeurs ou des indicateurs de performances relatifs à l'objectif et qui définissent le domaine de fonctionnement normal ou souhaité du système considéré.

Formellement, pour  $L_j$  ( $l=1, \dots, L_j$ ) indicateurs de performance associés à la production d'un produit de type  $j$ , l'expression de l'objectif relatif pour chacun d'eux est définie par son intervalle de tolérance (domaine d'admissibilité) comme suit :

$$P_{jl}^{obj} = [P_{jl}^{\min}, P_{jl}^{\max}], \quad \forall l, j=1, \dots, J. \quad (20)$$

L'intervalle de tolérance  $P_{jl}^{obj}$  indique les bornes limites des valeurs espérées de l'indicateur de performance  $l$  du produit de type  $j$ .

Nous considérons les indicateurs de performance globaux utilisés dans (Ioannidis *et al.*, 2004). Les auteurs utilisent les informations globales suivantes pour chaque type de produit  $j$  :

- $P_{j1}$  : le surplus final moyen  $\bar{S}_{ijk}$ , avec  $\theta_{ijk}=0$ ,
- $P_{j2}$  : le surplus final instantané  $S_{ijk}$ , avec  $\theta_{ijk}=0$ ,
- $P_{j3}$  : l'erreur relative moyenne  $e_{wip_j}$  de l'encours global  $WIP_j$  (*Work-In-Process*) du produit type  $j$ .

avec :

$$e_{wip_j} = \frac{WIP_j(t_n) - \overline{WIP}_j(t_n)}{\overline{WIP}_j(t_n)} \quad (21)$$

où

$$\overline{WIP}_j(t_n) = \sum_{\{i,k|\theta_{ijk}=1\}} [x_{ijk}(t_n) + u_{ijk}(t_n)\delta_n] \quad (22)$$

représente l'encours instantané global du produit de type  $j$  donné par la somme des niveaux des stocks  $B_{ijk}$  ainsi que le nombre de produits en cours de traitement sur les machines, et

$$\overline{WIP}_j(t_n) = \frac{1}{t_n} \sum_{l=1}^n WIP_j(t_l)\delta_l \quad (23)$$

est le niveau d'encours global moyen du produit de type  $j$ . L'erreur relative est utilisée comme mesure de performance de l'encours global du fait de la difficulté d'obtenir une estimation de sa moyenne optimale. Cela est basé sur la constatation suivante : l'encours nécessaire pour une bonne synchronisation des opérations dans un système de production est approximativement égal à sa moyenne (Ioannidis *et al.*, 2004).

Les indicateurs  $P_{j1}$  et  $P_{j2}$  permettent de maintenir une demande proche de la production (réduire les retards et les surplus), tandis que  $P_{j3}$  est utilisé pour réduire les encours dans le système pour chaque type de produit.

## 5.2 Supervision par agrégation d'informations

Un des objectifs majeurs du superviseur est :

- d'améliorer les performances globales du système par rapport aux objectifs de production et
- d'augmenter la robustesse du système vis-à-vis des perturbations.

Nous proposons alors un mécanisme de supervision sur la base d'agrégation d'informations issues de l'évaluation des performances relatives à chaque indicateur global (Tamani *et al.*, 2007, 2008).

Afin de pouvoir évaluer l'expression de la performance, nous considérons la représentation par intervalle des indicateurs globaux, décrite précédemment. Cette représentation permet de définir le domaine de fonctionnement admissible du système d'un point de vue global. L'objectif du superviseur dans ce cas est alors double :

- d'une part, il définit le mode de fonctionnement à partir de l'expression de la performance et,
- d'autre part, il élabore l'action globale en se basant sur le degré d'éloignement des informations globales par rapport aux objectifs.

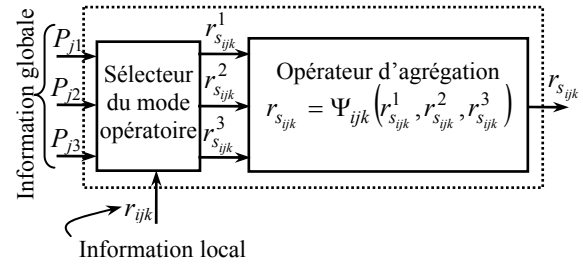


Figure 4. Synoptique du mécanisme de supervision par opérateur d'agrégation.

### 5.2.1 Sélecteur du mode opératoire

Dans le schéma de principe de la Figure 4, si on considère le sous-contrôleur flou associé à  $m_{ijk}$ , le superviseur reçoit en entrée les mesures de performance  $p_l$  des  $L$  indicateurs globaux ( $l=1, \dots, 3$ ) ainsi que la commande locale  $r_{ijk}$ . À partir de l'expression de la performance résultant de la comparaison, au sens d'un éloignement, entre les bornes de l'intervalle de tolérance et la mesure associée, le superviseur indique le domaine de fonctionnement du système.

En effet, pour une mesure de performance  $p_{jl}$  associée à l'indicateur  $P_{jl}$  du produit de type  $j$ , le fonctionnement est dit en mode « normal » ou « souhaité » si :

$$\forall l, p_{jl} \in P_{jl}^{obj} = [P_{jl}^{\min}, P_{jl}^{\max}] \quad (24)$$

Dans ce cas, le superviseur ne modifie pas la commande locale  $r_{ijk}$ , i.e., l'action du superviseur  $r_{sijk}^l$  associée à  $P_{jl}$  est nulle.

Par ailleurs, si la condition (24) n'est pas vérifiée pour au moins un indicateur, c'est-à-dire :

$$\exists l, p_{jl} \notin P_{jl}^{obj} = [P_{jl}^{\min}, P_{jl}^{\max}] \quad (25)$$

alors le système est dit en fonctionnement *dégradé* ou *perturbé*. Dans ce cas, le superviseur décide soit d'allouer de la capacité restante (dans le cas d'un retard sur l'objectif) ou de réduire la cadence de production (dans le cas d'un surplus par rapport à l'objectif).

En effet, si :

$$p_{jl} > P_{jl}^{\max} \Rightarrow r_{sijk}^l(t_n) = -r_{ijk}(t_n) \quad (26)$$

L'action du superviseur consiste à stopper la production de  $m_{ijk}$ .

D'autre part, si :

$$p_{jl} < P_{jl}^{\min} \Rightarrow r_{sijk}^l(t_n) = 1 - r_{ijk}(t_n) \quad (27)$$

La commande de superviseur dans ce cas consiste à allouer toute la capacité restante à  $m_{ijk}$ .

### 5.2.2 Opérateur d'agrégation

L'objectif ici est de proposer un moyen de combiner les différentes actions du superviseur associées aux indicateurs de performance. Pour cela, nous proposons un mécanisme d'agrégation basé sur l'opérateur le plus simple, à savoir la somme pondérée (Tamani *et al.*, 2007, 2008).

Dans ce cas, l'expression de l'action du superviseur agrégée  $r_{s_{ijk}}^l$  associée à  $m_{ijk}$ , est calculée de la façon suivante :

$$r_{s_{ijk}}^l(t_n) = \Psi_{ijk}(r_{s_{ijk}}^1, \dots, r_{s_{ijk}}^3) = \sum_{l=1}^3 w_{jl} \cdot r_{s_{ijk}}^l(t_n) \quad (28)$$

Il s'agit alors de déterminer les poids  $w_{jl}$  associés aux actions  $r_{s_{ijk}}^l$ , vérifiant les deux propriétés suivantes :

$$\sum_{l=1}^3 w_{jl} = 1, w_{jl} \in [0, 1], l=1, \dots, 3.$$

Comme l'expression de la performance est évaluée suivant le degré d'éloignement de la mesure par rapport à l'objectif, nous proposons d'utiliser ce critère pour estimer les poids associés aux différentes actions.

En effet, si on définit par  $\Delta_{jl}$  la distance entre la mesure de la performance  $l$  du produit de type  $j$  et les bornes de l'intervalle de tolérance de l'objectif associé  $P_{jl}^{obj}$ , celle-ci s'exprime alors comme suit :

$$\Delta_{jl} = \begin{cases} |p_{jl} - P_{jl}^{\min}| & \text{if } p_{jl} < P_{jl}^{\min} \\ |p_{jl} - P_{jl}^{\max}| & \text{if } p_{jl} > P_{jl}^{\max} \\ 0 & \text{if } p_{jl} \in P_{jl}^{obj} \end{cases}$$

Cette distance est normalisée par rapport à la largeur de l'intervalle de tolérance  $P_{jl}^{obj}$  comme suit :

$$\Delta_{jl}^n = \frac{\Delta_{jl}}{P_{jl}^{\max} - P_{jl}^{\min}}$$

Dans ce cas, le poids  $w_{jl}$  associé à l'action  $r_{s_{ijk}}^l$  de la performance  $p_{jl}$  est calculé de la façon suivante :

$$w_{jl} = \frac{\Delta_{jl}^n}{\sum_{l=1}^3 \Delta_{jl}^n}$$

Dans ce cas, plus l'éloignement de l'information de l'objectif est grand, moins est la satisfaction de la performance, et donc plus le poids associé à son action est fort.

### 5.2.3 Mécanisme d'allocation de capacité

L'action globale (superviseur et commande locale) consiste à allouer la capacité restante pour chaque opération d'un type de produit. La capacité restante est estimée, à chaque instant, comme suit :

$$RT_i(t_n) = \left( 1 - \sum_{\{j | r_{ijk}(t_n)=1\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} u_{ijk}^{\max} \tau_{ijk} r_{ijk}(t_n) - \sum_{\{j | 0 < r_{ijk}(t_n) < 1\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} [r_{ijk}(t_n) + r_{s_{ijk}}(t_n)] u_{ijk}^{\max} \tau_{ijk} \right) \quad (29)$$

Afin de distribuer la capacité restante parmi les différents types de produit, la priorité est donnée aux

produits dont la production est inférieure à la demande, i.e., ceux pour lesquels le surplus local est négatif. Autrement dit, toute la capacité restante est destinée aux sous-machines  $m_{ijk}$  dont la commande locale générée  $r_{ijk}=1$  (Ioannidis *et al.*, 2004).

Soit, dans ce cas, nous définissons la variable binaire  $\beta_{ijk}$  comme suit :

$$\beta_{ijk}(t_n) = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ijk}(t_n) < 1 \\ 1 & \text{if } r_{ijk}(t_n) = 1 \end{cases}$$

La capacité restante de la machine  $M_i$  dévolue à chaque type de produit de priorité élevée est alors donnée par :

$$E_{ijk}(t_n) = RT_i(t_n) \cdot \left( \frac{d_j \tau_{ijk} \beta_{ijk}(t_n)}{\sum_{\{j | j \in Q(i)\}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} d_j \tau_{ijk} \beta_{ijk}(t_n)} \right)$$

D'où finalement, le taux de production de la sous-machine  $m_{ijk}$ , et donc la capacité allouée à chaque instant :

$$u_{ijk}(t_n) = r_{ijk}(t_n) u_{ijk}^{\max} + E_{ijk}(t_n) \cdot \left( \frac{1}{\tau_{ijk}} \right) \quad (30)$$

Le taux de production (33) s'exprime à partir d'un modèle d'approximation continu des flux. Il est alors nécessaire de définir l'instant de chargement (*loading time*) de chaque produit sur la machine dans le modèle de simulation. Pour notre part, la politique appliquée est la stratégie en escalier, *staircase strategy* (Gershwin, 1994). Cette politique revient à faire un chargement de produit chaque fois que la production actuelle cumulée d'un type de produit à un instant donné est inférieure ou égale à l'intégrale du taux de production jusqu'à cet instant (production théorique).

## 6 MODELE DE SIMULATION A FLUX CONTINU

Pour illustrer l'approche de pilotage par allocation de capacité, nous considérons un modèle de simulation à flux continu d'un système de production de semi-conducteurs constitué de 10 machines et ayant deux processus de fabrication. Le premier processus appelé *poly-gate capacitor* comporte 17 opérations et le deuxième dénommé *poly-monitor* en contient 7. Il y a autant de stocks intermédiaires que d'opérations. Le routage de chaque processus ainsi que les temps opératoires sont donnés dans le Tableau 1. Les taux de panne et de réparation des différentes machines sont donnés dans le Tableau 2.

Le modèle de simulation est implémenté avec l'outil *MATLAB/Simulink* et la librairie *Floulib* développé au sein de notre laboratoire et dédiée à la synthèse du contrôle flou (Foulloy *et al.*, 2006).

Les intervalles de tolérance des différents objectifs sont choisis comme suit :

$$P_{j1}^{obj} = P_{j2}^{obj} = [-1, +1], P_{j3}^{obj} = [-0.5, +0.5]$$

Processus $j$	Opération $k$	Machine $i$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Processus 1: <i>poly-gate capacitor</i>	1	0.25	0.469	0.969	0.469	0.469	0.25	0.156	0.188	0.031	0.469
	2	0.25	-	-	-	-	-	0.156	0.188	0.031	0.469
	3	-	-	-	-	-	-	-	0.188	0.063	-
Processus 2: <i>poly-monitor</i>	1	0.25	-	0.656	0.469	0.469	-	0.156	-	0.063	0.469
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 1. Temps opératoires des machines pour les deux processus.

	Machine $i$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_i$	0.01	0.001	0.002	0.002	0.017	0.002	0.002	0.01	0.001	0.01
$\mu_i$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.33	0.5	0.33	0.5	0.5	0.33

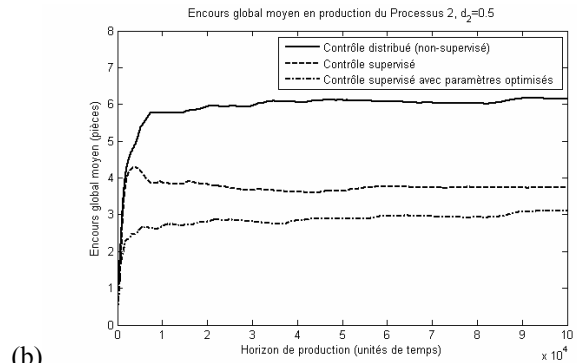
Tableau 2. Taux de panne et de réparation des différentes machines.

La demande pour le Processus 1 est fixée à  $d_1=0.6$  pièce/unité de temps, tandis que celle du Processus 2 est fixée à  $d_2=0.5$  pièce/unité de temps. 5 répliques de 100000 unités de temps pour chaque scénario de simulation sont considérées et les résultats sont donnés en moyenne sur l'ensemble des simulations effectuées. Dans un premier temps, les paramètres des contrôleurs : taille des stocks et niveaux de sécurité du surplus, sont tous fixés respectivement à 8 et 3.

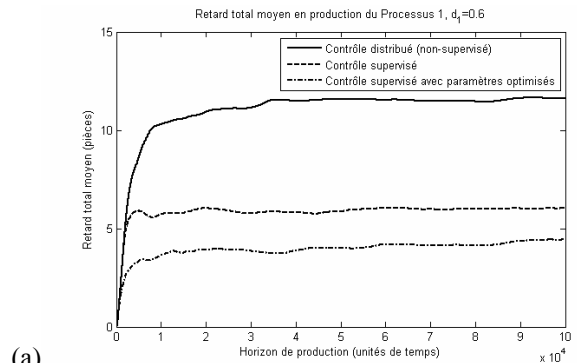
Un comparatif entre le contrôle distribué (non-supervisé) et le contrôle supervisé pour les performances d'encours global et de retard total de la production de chaque processus sont illustrés sur les Figures 5 et 6. Les performances de l'encours sont obtenues avec un intervalle de confiance à 95% pour le processus 1 et 99% pour le processus 2.

Ensuite, les paramètres des contrôleurs sont fixés en résolvant (14) et (15) pour la taille des stocks, et (17) pour le niveau du surplus de sécurité, et appliqué au contrôle supervisé. Un comparatif avec les résultats précédents est donné sur les Figures 5 et 6. Les performances de l'encours dans ce cas sont obtenues avec un intervalle de confiance à 99% pour le processus 1 et 90% pour le processus 2.

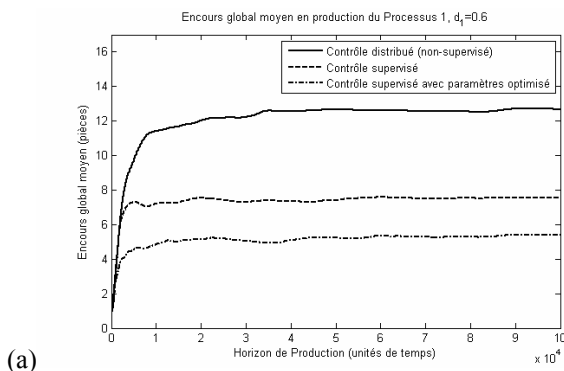
Ces différents résultats montrent une amélioration des performances dans le cas supervisé comparé au contrôle distribué. En fixant les paramètres du système selon l'heuristique développé dans la section 4.1.3, les performances du contrôle supervisé sont améliorées.



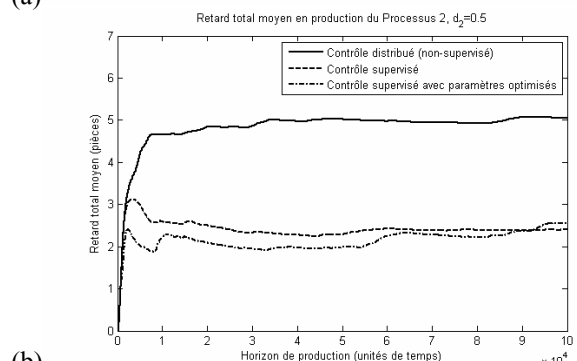
(b) Figure 5. Encours global moyen : (a) Processus 1, (b) Processus 2.



(a) Figure 6. Retard total moyen : (a) Processus 1, (b) Processus 2.



(a)



(b)

## CONCLUSION

Dans cet article, nous avons abordé la simulation des flux dans des systèmes de production complexes en considérant :

- une modélisation fluide des flux de production afin de réduire la complexité du système et
- une approche de pilotage par allocation de capacité de production pour réguler les flux.

Nous avons alors décrit notre modélisation par approximation continu des flux. Cette approche considère les flux d'un point de vue « *macroscopique* », ce qui permet de réduire considérablement la complexité par rapport à une représentation purement discrète. Ensuite nous avons proposé une approche de pilotage à deux niveaux pour la régulation des flux continus :

- Un niveau de contrôle local distribué où un contrôleur flou est synthétisé au niveau de chaque module de production afin de réguler les flux entrant et sortant.
- Un niveau de supervision doté d'une vue globale du système et coordonnant les actions locales afin d'optimiser le fonctionnement global du système

L'approche de pilotage développée permet de tenir compte des :

- informations locales et globales du système dans l'élaboration de l'action local,
- du degré d'atteinte des objectifs de production dans l'élaboration de l'action globale.

Les résultats de simulation montrent une amélioration en terme de performances globales sous l'action du superviseur comparé à un contrôle totalement distribué.

Une perspective à ce travail consiste à tenir compte des incertitudes liées aux objectifs de production et aux entrées du système (fluctuation de la demande). Une représentation floue des intervalles de tolérance peut permettre d'améliorer l'efficacité du pilotage dans ce cas.

## REFERENCES

- Bai, X. and S.B. Gershwin, 1995. Scheduling Manufacturing Systems with Work-In-Process Inventory Control: Single-Part-Type Systems. *IIE Transactions*, 27, p.599–617.
- Bai, X. and S.B. Gershwin, 1994. Scheduling Manufacturing Systems with Work-In-Process Inventory Control: Multiple-Part-Type Systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 2, pp.365–385, February.
- Balduzzi, F. and G. Menga, 1998. A state variable model for the fluid approximation of flexible manufacturing systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, p.1172–1178.
- Balduzzi F., G. Giua, and C. Seatzu, 2001. Modeling and simulation of manufacturing systems with first order hybrid Petri nets. *International Journal of Production Research*, 39(2), p. 255-282.
- Foulloy, L., R. Boukezzoula, and S. Galichet, 2006. An educational tools for fuzzy control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(2), p.217–221.
- Gershwin, S.B., 2000. Design and Operation of Manufacturing Systems - The Control Point Policy. *IIE Transactions*, 32(2), p.891–906.
- Gershwin, S.B., 1994. Manufacturing Systems Engineering. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Habchi, G. and C. Berchet, 2003. A model for manufacturing systems simulation with control dimension. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11, p.21–44.
- Ioannidis, S., N.C., Tsourveloudis, and K. Valavanis, 2004. Fuzzy supervisory control of manufacturing systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3), p.379–389.
- Kouikoglou, V.S. and Y.A. Phillis, 1997a. A continuous-flow model for production networks with finite buffers, unreliable machines, and multiple products. *International Journal of Production Research*, 35, p.381–397.
- Kouikoglou, V.S. and Y.A. Phillis, 1997b. Review of a fast simulation method for the analysis of queuing networks. *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, 13, p.73–83.
- Perkins, J.R. and R. Srikant, 1997. Scheduling multiple-part-types in an unreliable machine manufacturing system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(3), p. 364–377.
- Sharifnia, A., 1994. Stability and Performance of Distributed Production Control Methods based on Continuous-Flow Models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(4), p.725–737.
- Suri, R., and B.R. Fu, 1994. On using continuous flow model lines to model discrete production lines. *Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 4, p. 127–169.
- Tamani K., R. Boukezzoula and G. Habchi, 2007. Hierarchical control for continuous flow simulation of manufacturing systems. *6<sup>th</sup> EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Ljubljana, Slovenia.
- Tamani K., R. Boukezzoula, G. Habchi, 2008. Supervisory based capacity allocation control for manufacturing systems. Accepted for publication *Int. J. of Manufacturing Technology and Management*.
- Takagi, T. and M. Sugeno, 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15, p. 116–132.
- Tsourveloudis, N.C., E., Dretoulakis, and S. Ioannidis, 2000. Fuzzy work-in-process inventory control of unreliable manufacturing systems. *Information Sciences*, 127, p. 69–83.
- Xie, X., 2002. Fluid-stochastic-event graphs for evaluation and optimisation of discrete-event system with failures. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(3), p. 360–367.