



# Pilotage Flou Distribué et Supervisé pour la Régulation des Flux de Production

Karim Tamani, Reda Boukezzoula, Georges Habchi

## ► To cite this version:

Karim Tamani, Reda Boukezzoula, Georges Habchi. Pilotage Flou Distribué et Supervisé pour la Régulation des Flux de Production. LFA 2008, Oct 2008, Lens, France. pp.CD ROM, 2008. <hal-00403826>

**HAL Id: hal-00403826**

<http://hal.univ-smb.fr/hal-00403826>

Submitted on 28 Sep 2011

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

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

# Pilotage flou distribué et supervisé pour la régulation des flux de production

## Distributed and supervised fuzzy control for production-flow regulation

K. Tamani<sup>1</sup>      R. Boukezzoula<sup>1</sup>      G. Habchi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Université de Savoie, Polytech'Savoie, <sup>1</sup>LISTIC

<sup>2</sup>SYMME,

<sup>1,2</sup>Domaine Universitaire – BP 80439, 74944 Annecy-le-Vieux Cedex France.

{karim.tamani, reda.boukezzoula, georges.habchi}@univ-savoie.fr.

### Résumé :

Dans cet article, une structure de pilotage distribuée et supervisée pour la régulation des flux de production est proposée. Partant de la décomposition d'un système de production en un ensemble de modules élémentaires, une structure de pilotage distribuée de type multi-contrôleurs est déployée au niveau « local ». A ce niveau, chaque module de production est piloté par un contrôleur flou afin de satisfaire la demande et d'éviter les phénomènes de rupture et de blocage.

Afin d'améliorer les performances de cette structure, un niveau de supervision est intégré. Ce dernier a pour rôle de coordonner les actions locales et de réaliser des compromis entre les objectifs globaux. La conception du superviseur s'appuie sur l'exploitation des opérateurs d'agrégation et la quantification des objectifs par des intervalles flous. Un exemple de simulation est considéré pour illustrer les performances de la méthodologie proposée.

### Mots-clés :

Système de production, contrôle flou distribué, supervision, intervalles flous, opérateurs d'agrégation.

### Abstract:

In this paper, a distributed and supervised control structure for production-flow regulation is proposed. Based on the decomposition of the production system into elementary modules, a distributed control structure is deployed at the local level (operational). In this level, for each basic production module, a fuzzy controller is designed to satisfy the demand and to avoid machine starvation or blocking. In order to improve the overall system performances, a supervision level is integrated. The supervisor role is to coordinate the local actions and realize a satisfactory compromise between the global objectives. The supervisor design is based on the aggregation operators and the fuzzy intervals representation to quantify the global objectives. The

feasibility of the proposed methodology is validated with a simulation example.

### Keywords:

Production system, distributed fuzzy control, supervision, fuzzy intervals, aggregation operators.

## 1 Introduction

Dans cet article, nous nous intéressons au problème de pilotage des flux dans des systèmes de production à haute cadence (agro-alimentaire, semi-conducteurs, ...) L'objectif du pilotage ici consiste à maintenir la fluidité des flux en présence de certains aléas de fonctionnement afin d'assurer le respect et le suivi des performances globales désirées (suivi de la demande, minimisation de l'encours et du retard, ...) Dans ce contexte, une méthodologie de pilotage à deux niveaux hiérarchiques est adoptée : un niveau bas de « commande locale » et un niveau haut de « supervision ».

Afin de simplifier l'analyse du système de production et la conception d'une stratégie de pilotage, une décomposition du système en modules de production élémentaires *MP* est adoptée [16]. Chaque module *MP* est constitué d'une machine et de ses stocks amont et aval. Partant de cette décomposition, une structure modulaire de pilotage local de type distribuée est proposée. Cette dernière consiste à associer à chaque *MP* un contrôleur

afin de réguler, indépendamment des autres, les flux traversant ce dernier. En effet, l'objectif de chaque contrôleur est de maintenir un surplus de production minimal capable d'absorber les perturbations propagées sous formes de rupture et de blocage. Dans ce contexte, la recherche de ce contrôleur sous une forme analytique et optimale est souvent très difficile à trouver [10] (paramètres non-homogènes, présence d'incertitudes et de perturbations). Dans le but de remédier à ce problème, une solution peut être envisagée à partir d'une représentation du comportement du contrôleur par un formalisme exhibant les relations entre les entrées, les sorties et les états par des mécanismes issus de l'intelligence artificielle. C'est cette méthodologie qui est adoptée dans cet article où un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno est proposé [11, 12].

Toutefois, dans bien des cas, cette structure de pilotage ne permet pas d'anticiper suffisamment les perturbations relatives à l'environnement du système. En effet, chaque *MP* interagit uniquement avec ses modules voisins via les stocks intermédiaires. La communication entre modules n'ayant pas de lien direct s'effectue par propagation d'informations, de proche en proche, ce qui peut être relativement lent pour des systèmes de grande dimension. D'autre part, les objectifs de production sont évalués à travers des indicateurs de performance globaux qui ne sont pas pris en compte explicitement dans le contrôle local. Dans ce contexte, il est établi que la satisfaction des objectifs locaux n'implique pas forcément le respect des objectifs globaux [7]. De plus, le caractère, très souvent, conflictuel entre les objectifs de production nécessite un mécanisme capable de générer des décisions en cohérence avec les actions locales et qui satisfassent le compromis entre les objectifs globaux.

Partant de ces faits, un niveau de supervision est intégré dans la structure de pilotage. Ainsi, l'action du superviseur est déployée sous forme d'une composante additive à la loi de commande locale lorsqu'une dérive, au sens

de non satisfaction des objectifs globaux, est constatée. Cette composante additive est synthétisée selon un mécanisme intégrant un processus décisionnel à base d'opérateurs d'agrégation. Ce dernier consiste à agréger à la fois les valeurs des indicateurs globaux du système et leurs objectifs spécifiés (valeurs souhaitées) quantifiés par des intervalles flous.

La suite de l'article est organisée de la façon suivante : tout d'abord, nous donnons les hypothèses et les formulations considérées dans cet article. Après une description, dans la section 3, de la structure de contrôle locale, nous détaillons dans la section 4 la structure du superviseur. La section 5 est consacrée à l'illustration, via la simulation, des performances de la méthode proposée sur un système de production tiré de la littérature.

## 2 Hypothèses et formulations

Un système de production composé de  $N$  machines  $M_i$  peut-être vu comme l'interconnexion d'un ensemble de modules de production  $MP(i)$ ,  $i = 1, \dots, N$  [16].

Par souci de simplicité, le pilotage est détaillé pour une ligne de transformation mono-produit (cf. Figure 1), mais la méthodologie peut être généralisée pour un fonctionnement en multi-produit et en présence d'opérations d'assemblage et de désassemblage avec possibilité de phases cycliques [9, 13, 15].

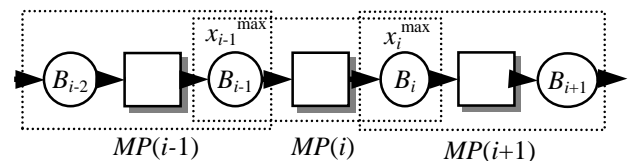


Figure 1 – Ligne de transformation.

Dans notre formulation, nous considérons :

- $d$  est le taux de demande supposé constant.
- $e_i$  est la disponibilité intrinsèque d'un  $MP(i)$  estimée par rapport aux taux de panne  $\lambda_i$  et de réparation  $\mu_i$  de  $M_i$ .

- les paramètres  $\lambda_i$  et  $\mu_i$  sont stochastiques et suivent des distributions exponentielles. Dans ce cas,  $e_i = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i)$ .
- $u_i^{\max} = 1/\tau_i$  est le taux de production maximal que  $M_i$  peut atteindre pour une opération de durée  $\tau_i$ .
- la condition de faisabilité de la demande s'exprime par [9] :  $d \leq e_i u_i^{\max}$ .
- l'état de  $M_i$  est donné par une variable binaire  $\alpha_i(t)$ , i.e.  $\alpha_i(t) = 0$  si  $M_i$  est en panne et  $\alpha_i(t) = 1$  lorsqu'elle est opérationnelle.
- $r_i(t) \in [0, 1]$  est la fraction de la capacité maximale de  $M_i$ . C'est la variable de contrôle dans notre formulation.
- $u_i(t)$  est le taux de production de  $M_i$  tel que  $u_i(t) = r_i(t) u_i^{\max}$ .
- $x_i^{\max}$  est la capacité maximale du stock  $B_i$ .
- $x_i(t)$  est le niveau du stock  $B_i$  à l'instant  $t$ .
- $y_i(t)$  est la production cumulée de  $M_i$  jusqu'à l'instant  $t$ .
- $s_i(t)$  est la variable du surplus qui traduit la différence entre la production et la demande cumulées.

### 3 Pilotage flou distribué

De par la décomposition du système de production en une collection de modules élémentaires  $MP(i)$ , la problématique de commande distribuée peut être appréhendée à partir de la conception générique d'un seul contrôleur flou  $CF(i)$ . Ainsi, chaque module  $MP(i)$  dispose de son propre contrôleur  $CF(i)$ , conduisant à une structure distribuée.

Dans ce cadre, une approche à base du surplus [5], dont le principe est illustré sur la Figure 2, est adoptée. A partir de l'erreur (surplus  $s_i(t)$ ) entre la sortie (production  $y_i(t)$ ) et la demande cumulée et l'état des stocks adjacents  $x_{i-1}$  et  $x_i$ ,  $CF(i)$  a pour objectif d'élaborer la commande capable d'amener la sortie à suivre la demande désirée tout en éliminant ou en anticipant les phénomènes de rupture et de blocage.

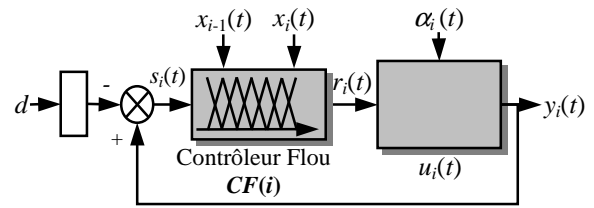


Figure 2 – Structure d'un module contrôlé.

Dans la conception du contrôleur flou, la répartition des univers de discours  $[0, x_i^{\max}]$  et  $[0, x_{i-1}^{\max}]$  des variables des stocks est laissée à l'appréciation de l'expert. Pour des raisons de simplicité, un partitionnement strict avec des fonctions d'appartenance triangulaires régulièrement réparties est utilisé. Par exemple, l'expert peut décider d'utiliser cinq attributs pour décrire le niveau du stock  $x_i(t)$  : « Vide », « Presque Vide », « Normal », « Presque Saturé » et « Saturé ». Ces attributs se traduisent par cinq symboles flous  $X_i = \{X_i^l\}_{l=1, \dots, 5}$  (cf. Figure 3.a). Le même raisonnement est utilisé pour  $x_{i-1}(t)$ .

Le partitionnement de l'univers de discours de  $s_i(t)$  est effectué selon la valeur d'un seuil  $z_i$  qui définit une marge de production capable d'absorber les aléas de fonctionnement [1]. Nous considérons alors trois symboles pour interpréter l'état du surplus : « Retard », « Normal » et « Excès ». Soit alors  $S_i = \{S_i^l\}_{l=1, \dots, 3}$ . La valeur modale du symbole « Normal » représente le seuil  $z_i$ . Comme cette valeur est supposée positive, l'univers de discours est alors choisi égal à  $[0, 2z_i]$  (cf. Figure 3.b).

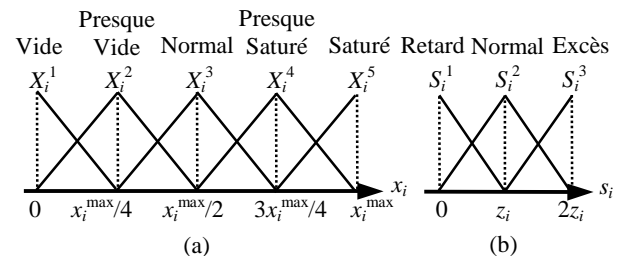


Figure 3 – Répartition des univers de discours (a) les stocks, (b) le surplus.

Concernant la sortie du contrôleur flou, suivant l'état des variables  $x_{i-1}(t)$ ,  $x_i(t)$  et  $s_i(t)$ ,

l'expert peut décider de fixer  $r_i(t)$  au : « maximum : 100% de la capacité », « proche du maximum : 75% », « moyen : 50% », « proche de zéro : 25% » ou « zéro : 0% ». Dans le contexte d'un contrôleur flou de Sugeno, ces descriptions peuvent être interprétées par des valeurs constantes exprimant le pourcentage de capacité allouée à chaque instant. Les valeurs possibles sont : 1 (100%), 0.75 (75%), 0.5 (50%), 0.25 (25%) et 0 (arrêt de production).

Dans ce contexte, le  $CF(i)$  est représenté par une collection de règles de la forme suivante :

$$R_i^{(i_1, i_2, i_3)} : \text{ Si } x_{i-1} \text{ est } X_{i-1}^{i_1} \text{ et } x_i \text{ est } X_i^{i_2} \text{ et } s_i \text{ est } S_i^{i_3} \\ \text{ alors } r_i = \varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)}$$

avec :

- $X_{i-1}^{i_1}, X_i^{i_2}, S_i^{i_3}$  correspondent respectivement au  $i_v^{\text{ième}}$  ( $v = 1, 2, 3$ ) terme linguistique associé aux variables d'entrées  $x_{i-1}, x_i$  et  $s_i$ .
- $\varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)}$  est la conclusion de la règle indexée par  $(i_1, i_2, i_3)$ .

Pour un partitionnement strict des univers de discours des entrées, la sortie générée par le contrôleur flou est donnée par :

$$r_i(t) = \sum_{(i_1, i_2, i_3)} \xi_i^{(i_1, i_2, i_3)}(x_{i-1}, x_i, s_i) \cdot \varphi_i^{(i_1, i_2, i_3)}$$

où  $\xi_i^{(i_1, i_2, i_3)}(x_{i-1}, x_i, s_i) = \mu_{X_{i-1}^{i_1}}(x_{i-1}) \cdot \mu_{X_i^{i_2}}(x_i) \cdot \mu_{S_i^{i_3}}(s_i)$  représente le degré de vérité des prémisses de la règle indexée  $(i_1, i_2, i_3)$ . La base complète, donnée dans [14, 15], est composée de 75 règles construites selon ces observations :

- Si le surplus est satisfaisant, alors ajuster le taux de production en fonction des stocks amont et aval afin d'éviter des rupture et blocage.

- Si le surplus n'est pas satisfaisant, alors soit produire au maximum de la capacité disponible (cas de retard) soit stopper la production (cas d'excès).

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, nous utilisons 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.

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 et parfois incontrôlables [11].

#### 4 Pilotage flou distribué-supervisé

Afin d'améliorer la réactivité de la commande locale vis-à-vis des perturbations et assurer le suivi les objectifs globaux, nous proposons d'intégrer ces derniers à travers un niveau de supervision. La fonction de supervision consiste alors à coordonner les contrôleurs locaux afin d'atteindre un compromis satisfaisant entre les objectifs globaux. Cette fonction requiert une quantification des objectifs à partir de connaissances expertes.

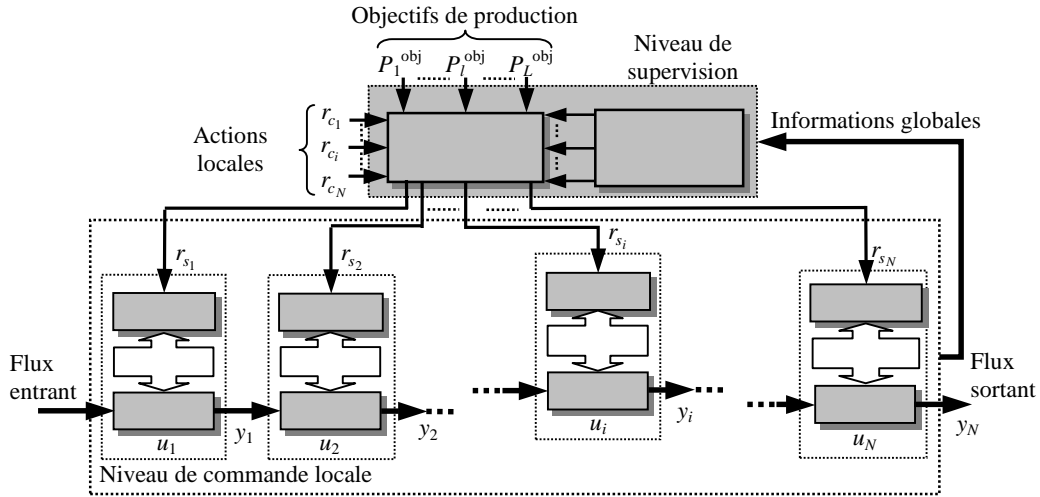


Figure 4 – Structure de pilotage distribuée-supervisée.

Par ailleurs, afin de considérer le comportement interne du système et de pouvoir ainsi agir en fonction de la capacité allouée sur chaque module, l'approche proposée intègre la commande locale, notée ici  $r_{c_i}(t)$ , en plus des performances globales évaluées à travers des indicateurs  $P_l$  ( $l = 1, \dots, L$ ). Dans ce cas, les objectifs globaux, notés  $P_l^{\text{obj}}$ , sont quantifiés par des intervalles flous. Ces intervalles constituent le référent des performances évaluées pour décider de l'action de supervision à appliquer au système. Cette dernière, notée  $r_{s_i}(t)$ , est déployée sous forme d'une composante additive à la commande locale  $r_{c_i}(t)$ . Soit alors la commande globale appliquée :

$$r_i(t) = r_{c_i}(t) + r_{s_i}(t) \quad (1)$$

Le schéma global de la structure de pilotage proposée est illustré sur la Figure 4.

#### 4.1 Représentation des objectifs

Pour des raisons de simplicité, uniquement les intervalles flous trapézoïdaux et triangulaires sont exploités dans cette étude. Soit alors la représentation par intervalle flou de l'objectif  $P_l^{\text{obj}}$  associé à l'indicateur  $P_l$  (cf. Figure 5).

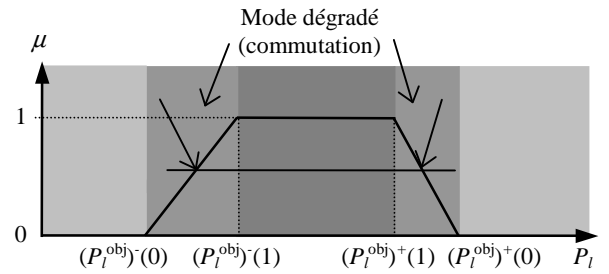


Figure 5 – Représentation de l'objectif  $P_l^{\text{obj}}$ .

Dans ce cas, nous considérons les définitions suivantes :

- Le support et le noyau de l'intervalle flou  $P_l^{\text{obj}}$  sont respectivement donnés par :

$$\begin{cases} P_l^{\text{obj}}(0) = [(P_l^{\text{obj}})^-(0), (P_l^{\text{obj}})^+(0)] \\ P_l^{\text{obj}}(1) = [(P_l^{\text{obj}})^-(1), (P_l^{\text{obj}})^+(1)] \end{cases}$$

- Pour définir complètement un intervalle flou, nous introduisons les profils gauche et droit définis comme suit [2,3] :

$$\begin{cases} (P_l^{\text{obj}})^-(\alpha) = (1-\alpha)(P_l^{\text{obj}})^-(0) + \alpha(P_l^{\text{obj}})^-(1) \\ (P_l^{\text{obj}})^+(\alpha) = (1-\alpha)(P_l^{\text{obj}})^+(0) + \alpha(P_l^{\text{obj}})^+(1) \end{cases}$$

où  $\alpha \in [0, 1]$ .

Ainsi, suivant cette représentation, la satisfaction d'un objectif peut être totale si la performance associée évolue à l'intérieur du noyau (mode normal :  $\alpha = 1$ ), totalement insuffisante si elle est à l'extérieur du support (mode totalement dégradé :  $\alpha = 0$ ) et enfin

partielle si elle évolue dans la zone des profils (mode dégradé ou de commutation). Ces différentes situations distinguent les modes de fonctionnement du système (cf. Figure 5).

A titre illustratif, soit les indicateurs de performance globaux utilisés dans [7] :

- $P_1$  : le surplus final moyen, qui représente le surplus en sortie du système,
- $P_2$  : le surplus final instantané,
- $P_3$  : l'erreur relative de l'encours moyen.

La représentation des objectifs associés à ces indicateurs est illustrée sur la Figure 6.

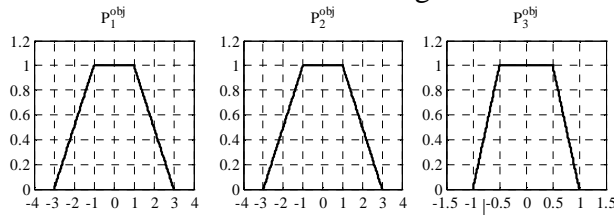


Figure 6 – Les intervalles flous des objectifs.

## 4.2 Agrégation des objectifs

La méthodologie que nous proposons pour l'élaboration de la composante additive de supervision se résume comme suit :

- L'agrégation des objectifs  $P_1^{obj}, \dots, P_L^{obj}$ . Cette étape consiste à déterminer, via un opérateur d'agrégation « incertain »  $\Psi$ , l'intervalle flou  $P_{ag}^{obj}$  de l'objectif agrégé.
- L'agrégation des mesures obtenues des indicateurs  $P_1, \dots, P_L$ . La mesure agrégée  $P_{ag}$  est calculée via un opérateur d'agrégation, noté  $\psi$ , qui est la version « précise » de l'opérateur  $\Psi$ .
- L'évaluation de  $P_{ag}$  par rapport à son objectif  $P_{ag}^{obj}$ . Ceci revient à « fuzzifier » la valeur précise  $P_{ag}$  sur l'intervalle flou de l'objectif agrégé  $P_{ag}^{obj}$  afin de définir son degré d'appartenance (son  $\alpha$ -coupe).

Dans la première étape, l'agrégation des objectifs revient à effectuer des opérations arithmétiques sur les intervalles flous [2, 3, 8]. Des opérateurs de compromis tels que la somme pondérée ou l'intégrale de Choquet [6] peuvent alors être exploités. La deuxième étape est effectuée en suivant le même raisonnement mais appliquée aux valeurs

précises des indicateurs. Enfin, dans la troisième étape, à partir de la performance agrégée obtenue ( $\alpha$ -coupe), la composante additive est élaborée selon la démarche suivante :

- Si  $P_{ag}$  évolue à l'intérieur du noyau de  $P_{ag}^{obj}$ , alors la satisfaction est totale ( $\alpha = 1$ ). Dans ce cas, la composante additive est nulle. Soit :

$$\text{Si } P_{ag} \in P_{ag}^{obj}(1), \text{ alors } r_{s_i}(t) = 0 \quad (2)$$

- Si  $P_{ag}$  évolue à l'extérieur du support de  $P_{ag}^{obj}$ , alors la performance est totalement dégradée ( $\alpha = 0$ ). Dans ce cas, la composante additive est définie comme suit :

$$\text{Si } P_{ag} \notin P_{ag}^{obj}(0), \text{ alors } r_{s_i}(t) = \Delta - r_{c_i}(t) \quad (3)$$

avec :

$$\Delta = \begin{cases} 1 & , \text{ si } P_{ag} < (P_{ag}^{obj})^-(0) \\ 0 & , \text{ si } P_{ag} > (P_{ag}^{obj})^+(0) \end{cases}$$

L'action du superviseur (3) tend soit à allouer le maximum de la capacité restante ( $\Delta = 1$ ) soit à stopper la production ( $\Delta = 0$ ).

- Si  $P_{ag}$  est dans la zone dégradée (représentée par les profils) alors la performance est satisfaite à différents degrés. L'action du superviseur est alors déterminée en fonction de son  $\alpha$ -coupe donnée par l'inversion de profils :

$$\text{Si } P_{ag} \in [(P_{ag}^{obj})^-(0), (P_{ag}^{obj})^-(1)],$$

$$\text{alors } \alpha = \frac{P_{ag} - (P_{ag}^{obj})^-(0)}{(P_{ag}^{obj})^-(1) - (P_{ag}^{obj})^-(0)}$$

Dans ce cas, la composante additive tend à augmenter la cadence de production par :

$$r_{s_i}(t) = (1 - \alpha) \cdot (1 - r_{c_i}(t)) \quad (4)$$

$$\text{Si } P_{ag} \in [(P_{ag}^{obj})^+(1), (P_{ag}^{obj})^+(0)],$$

$$\text{alors } \alpha = \frac{P_{ag} - (P_{ag}^{obj})^+(1)}{(P_{ag}^{obj})^+(0) - (P_{ag}^{obj})^+(1)}$$

Dans ce cas, la composante additive tend à réduire la cadence de production par :

$$r_{s_i}(t) = (1 - \alpha) \cdot (-r_{c_i}(t)) \quad (5)$$

Les valeurs de  $r_{s_i}(t)$  obtenues à partir de (2) et (3) définissent respectivement le noyau et le support d'un intervalle flou triangulaire noté  $R_{s_i}$ , tandis que les fonctions (4) et (5) fournissent respectivement ses profils droit et gauche. Cet intervalle représente le domaine de validité de la loi de supervision. L'évolution de  $r_{s_i}(t)$  en fonction du degré de satisfaction de  $P_{ag}^{obj}$  est illustrée sur la Figure 7.

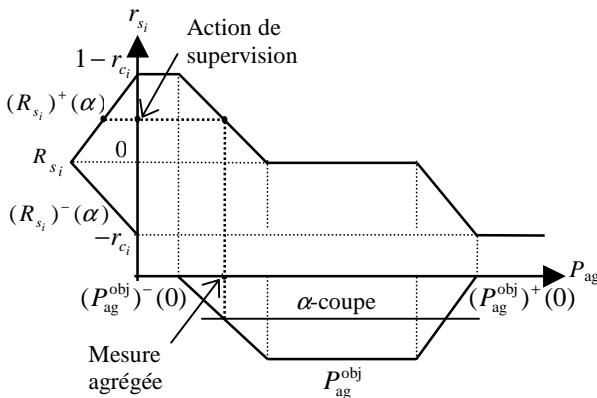


Figure 7 – Evolution de la loi de supervision.

La Figure 8 illustre le mécanisme de supervision par agrégation des objectifs.

## 5 Test de simulation et résultats

Afin d'illustrer les performances de la méthodologie de pilotage proposée, nous considérons l'exemple du système de production traité dans [7].

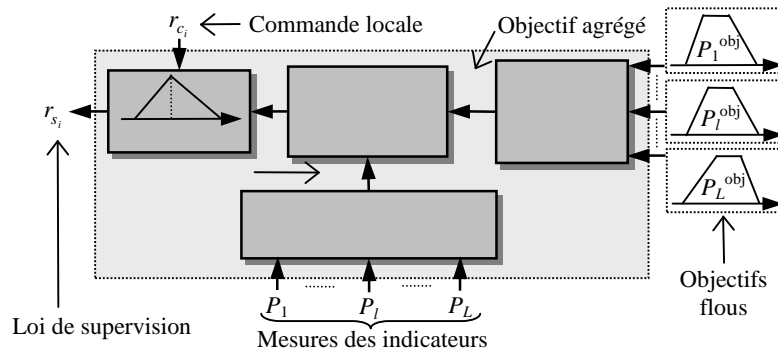


Figure 8 – Schéma de principe du superviseur.

Le système est composé de 7 **machines (modules)** interconnectés par 24 stocks intermédiaires de capacités finies et fixées à 10. Le système est capable de fabriquer 3 types de produits et comporte des opérations de transformation, d'assemblage, de désassemblage et des phases cycliques. La formulation de l'approche proposée au cas multi-produit est donnée dans [13, 15]. Les taux de panne et de réparation sont fixés respectivement à  $\lambda_i = 0.1$  panne/u.t. et  $\mu_i = 0.5$  réparation/u.t. pour  $i = 1, \dots, 7$ .

Pour chaque type de produit  $j = 1, \dots, 3$ , nous considérons les indicateurs de performance globaux définis dans [7] (rappelés dans la sous section 4.1), avec leurs intervalles flous  $P_{jl}^{obj}$  ( $l = 1, \dots, 3$ ) illustrés sur la Figure 6.

Les tests de simulation sont effectués sous MATLAB/Simulink et la librairie Floulib [4]. Différents taux de demande vérifiant la condition de faisabilité, soit  $0 < d_j \leq 1.38$ , sont considérés.



La Figure 10 montre les performances en termes de retard et d'encours pour chaque type de produit, obtenues via les approches suivantes :

- Approche distribuée floue sans supervision (notée « Approche 1 »),
- Approche de supervision développée dans [7] (notée « Approche 2 »),
- Approche supervisée proposée dans cet article (notée « Approche 3 »), avec comme opérateur d'agrégation la moyenne arithmétique.

Les résultats de simulation sont donnés en moyenne sur 10 réplifications de durée 10000 unités de temps chacune. A partir des résultats de simulation on peut déduire que :

- L'approche supervisée permet d'améliorer les performances du système par rapport au cas distribué.
- L'approche supervisée par allocation de capacité atteint des performances meilleures que celles obtenues par l'approche proposée dans [7].

Pour plus de détails sur l'applicabilité de la méthodologie proposée et ses performances sur d'autres cas de systèmes de production et avec d'autres opérateurs d'agrégation (intégrale de Choquet, somme pondérée, ...) le lecteur peut se référer à [15].

## 6 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une approche de pilotage distribuée et supervisée pour la régulation des flux dans des systèmes de production à haute cadence. La structure distribuée est de type multi contrôleurs où chaque module de production est piloté par son contrôleur flou. Cette structure locale est améliorée par un niveau de supervision dont le rôle est d'assurer le suivi des objectifs globaux. Le mécanisme de supervision proposée est basé sur la représentation des objectifs par des intervalles flous et l'exploitation des opérateurs d'agrégation.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant d'évaluer la robustesse de

l'approche et de la valider sur des cas industriels.

## Références

- [1] X. Bai and S.B. Gershwin. Scheduling Manufacturing Systems with Work-In-Process Inventory Control: Single-Part-Type Systems. *IIE Transactions*, 27: 599-617, 1995.
- [2] R. Boukezzoula, S. Galichet, L. Foulloy. MIN and MAX Operators for Fuzzy Intervals and their Potential Use in Aggregation Operators, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6): 1135-1144, 2007.
- [3] D. Dubois, H. Fargier and J. Fortin, A generalized vertex method for computing with fuzzy intervals, *In Proceeding of Fuzzy IEEE Conference*, pp. 541-546, 2004
- [4] L. Foulloy, R. Boukezzoula and S. Galichet. An educational tools for fuzzy control, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(2): 217-221, 2006.
- [5] S.B. Gershwin. Design and Operation of Manufacturing Systems – The Control-Point Policy. *IIE Transactions*, 32(2): 891-906, 2000.
- [6] M. Grabisch M. and M. Roubens. *Application of the Choquet integral in multicriteria decision making*. In *Fuzzy Measure and Integrals*, New York: Physica-Verlag, pp. 348-374, 2000.
- [7] S. Ioannidis, N.C. Tsourveloudis and K. Valavanis. Fuzzy supervisory control of manufacturing systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3): 379-389, 2004.
- [8] G.J. Klir. Fuzzy arithmetic with requisite constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 91(2): 165-175, 1997.
- [9] J. Perkins and P.R. Kumar. Stable Distributed Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing/Assembly/Disassembly Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(2): 139-148, 1989.
- [10] N. Srivatsan N. Synthesis of Optimal Policies for Stochastic Manufacturing Systems. Ph.D. thesis, MIT Operations Research Center, 1993.
- [11] M. Sugeno. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. *IEEE Transactions on Fuzzy set and Systems*, 7(2): 201-224, 1999.
- [12] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15: 116-132, 1985.
- [13] K. Tamani, R. Boukezzoula and G. Habchi. Hierarchical control for continuous flow simulation of manufacturing systems. *In Proceedings of the 6<sup>th</sup> EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Ljubljana, Slovenia, September, 2007.

[14] K. Tamani, R. Boukezzoula and G. Habchi. Supervisory based capacity allocation control for manufacturing systems simulation, *Accepted for publication in International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2008.

[15] K. Tamani. Développement d'une méthodologie de pilotage intelligent par régulation de flux

adaptée aux systèmes de production. Thèse de doctorat, Université de Savoie, France, Juin 2008.

[16] N.C. Tsourveloudis, E. Dretoulakis and S. Ioannidis. Fuzzy work-in-process inventory control of unreliable manufacturing systems. *Information Sciences*, 127: 69–83, 2000.

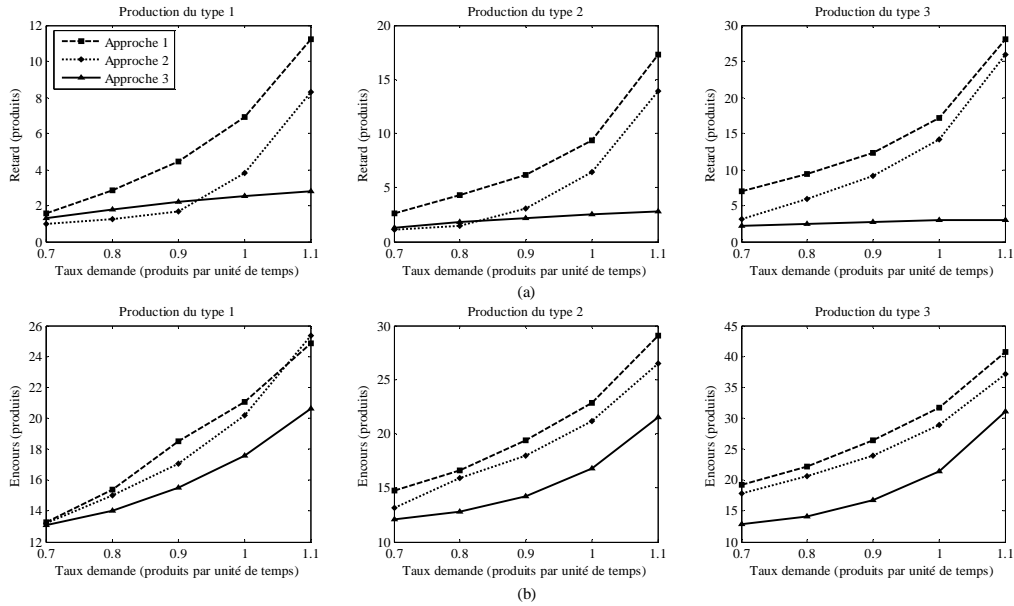


Figure 10 – Les moyennes des indicateurs : (a) retard, (b) encours.