Commande floue décentralisée pour une classe de systèmes interconnectés en réseau

Chedia Latrach[1] Mourad Kchaou[2] Ahmed El Hajjaji[1] Abdelhamid Rabhi[1]
[1] Université de Picardie Jules Verne Modélisation,MIS,7 Rue du Moulin Neuf 80000 Amiens,France
[2] Université de Sfax, Ecole Nationale d'ingenieurs de Sfax

chedia.latrach@yahoo.fr
mouradkchaou@yahoo.fr

2 septembre 2013

Résumé

L'objectif de ce papier concerne la synthèse d'un algorithme de contrôle-commande pour une classe de systèmes continus de grande dimension dans le cas où les fonctions de mesures et de contrôle sont distribuées sur des organes de calcul pouvant être partagés avec d'autres applications et connectés sur un réseau de communication numérique. Dans un premier temps, le système nonlineaire de grande dimension est décrit par un modèle flou Takagi-Sugeno (TS). Ensuite, en utilisant une fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii floue, des conditions suffisantes de stabilité asymptotique du comportement du système commandé en réseau décentralisé (DNCS), sont développées et formulées en termes d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMIs). Enfin, pour illustrer l'approche proposée, un exemple numérique et des résultats de simulation sont présentés.

Mots-clés : Système de grande dimension, Commande décentralisée, Système commandé en réseau (NCS), fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii, Inégalités Matricielles Linéaires LMI.

1 Introduction

La commande décentralisée des systèmes de grande dimension (appelés aussi systèmes interconnectés dans certains ouvrages) a reçu une attention considérable au cours des trois dernières décennies en raison de ses diverses applications tels que les systèmes électriques, les systèmes aéronautiques, les réacteurs nucléaires et les systèmes de contrôle de processus, etc. En effet, diverses techniques de commande décentralisée utilisant les inégalités matricielles linéaires (LMI) ont été récemment étudiées [2, 3, 4, 11]. Les systèmes de grandes dimensions consistent en un ensemble de sous-systèmes interconnectés, ce qui peut les éloigner les uns des autres, c'est pourquoi nous introduisons la notion de réseau de communication pour les relier, et ainsi les données sont échangées entre les différents sous-systèmes via le réseau de communication. Bien que, l'utilisation de ces réseaux pour la commande décentralisée présente des avantages en termes de flexibilité et de réduction des coûts d'installation et de maintenance, Il est bien connu qu'en raison de la limitation des ressources du réseau, les retards induits par le réseau et les pertes de paquets de données à travers le réseau pourraient dégrader les performances du DNCS et le conduire à l'instabilité. Le retard de communication, qui a des caractéristiques variant dans le temps, est l'une des questions importantes à prendre en considération dans l'analyse et la synthèse des NCSs [6], [7], [9], [10], [12], [13] et [14].

Ce travail rentre dans ce cadre et vise à développer un contrôleur décentralisé par retour d'état qui prend en compte les problèmes du retard dans la transmission et la réception des données et les pertes de paquets d'information pour les systèmes de grande dimension. En utilisant une fonctionnelle de Lyapunov Krasovskii floue, nous proposons des conditions de stabilisation par une commande décentralisée en réseau de type PDC (Parallel Distributed Compensation), formulées en termes des LMIs, incluant les problèmes liés au retard et aux pertes d'information dans le réseau de communication.

La structure de ce papier est comme suit, la deuxième partie consiste à décrire le système et préliminaires . La troisième section donne les principaux résultats, en décrivant la stratégie de commande en réseau et en présentant les conditions de synthèse de la loi de commande décentralisée qui fonctionne à travers un réseau de communication. La 4ème section est consacrée à la simulation. Finalement une conclusion est donnée dans la section 5.

Notations :$W + W^T$ est noté par $Sym(W)$.

Le symbole (*) représente les entrées symétriques dans une matrice.

2 Description du système et préliminaires

Soit un système flou de grande dimension S composé par J sous-systèmes interconnectés $S_i, i = 1, 2, ..., J$. Le $i^{ème}$ sous-système flou S_i est décrit par le modèle flou T-S suivant :

$$S_i : \begin{cases} \text{Si } \theta_{i1}(t) \text{ est} F_{i1}^l \text{ est...si } \theta_{ig}(t) \text{ est} F_{ig}^l \\ \text{Alors } \dot{x}_i(t) = A_i^l x_i(t) + B_i^l u_i(t) + \sum_{j=1}^{J} f_{ij}(x_j(t)) \end{cases} \tag{1}$$

Pour $i = 1, 2, ..., J$, $l = 1, 2..., r_i$, où $x_i(t)$ représente le vecteur d'état, $u_i(t)$ est le signal d'entrée de commande et, A_i^l et B_i^l sont des matrices réelles constantes de dimensions appropriées, $\theta_{i1}(t), \theta_{i2}(t), ..., \theta_{ig}(t)$, sont les variables de prémisse pour chaque sous-système S_i, $F_{iq}^l(q = 1, 2, ..., g)$ représentent les ensembles flous linguistiques de la règle floue et $f_{ij}(x_j(t))$ représentent les interconnections entre le sous-système S_i et sous-système S_j, et r_i représente le nombre des règles floues dans le sous-système S_i. En utilisant la défuzzification du centre de gravité, le système flou T-S peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l(\theta_i(t))[A_i^l x_i(t) + B_i^l u_i(t) \\ + \sum_{j=1}^{J} f_{ij}(x_j(t))] \end{aligned} \tag{2}$$

Où

$$\begin{aligned} h_i^l(\theta_i(t)) &= \frac{\upsilon_i^l(\theta_i(t))}{\sum_{l=1}^{r_i} \upsilon_i^l(\theta_i(t))}, \\ \upsilon_i^l(\theta_i(t)) &= \prod_{q=1}^{g} F_{iq}^l(\theta_{iq}(t)) \end{aligned} \tag{3}$$

Où $F_{iq}^l(\theta_{iq}(t))$ est le degré d'appartenance de $\theta_{iq}(t)$ dans l'ensemble flou F_{iq}^l. $h_i^l(\theta_i(t))$ est la fonction d'appartenance pour chaque règle floue, qui représente le degré d'appartenance normalisé, et satisfait

$$0 \leq h_i^l(\theta_i(t)) \leq 1, \text{ for } l = 1, 2, ..., r_i, \ \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l(\theta_i(t)) = 1$$

On suppose que le système S sera commandé à travers un réseau. La Fig. 1 suivante représente la structure de la commande en réseau d'un système S_i induisant des retards, où τ_{sci} est le retard entre le capteur-contrôleur et τ_{cai} est le retard contrôleur-actionneur. On suppose que le temps de calcul du contrôleur pour chaque sous-système peut être absorbée soit τ_{sci} ou τ_{cai}.

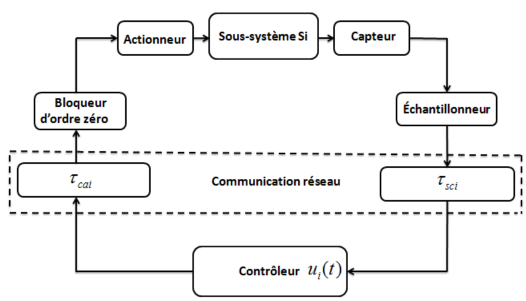

Figure 1 – Schéma du système commandé en réseau pour chaque sous-système S_i

Dans ce travail, nous considérons les hypothèses suivantes :

1. Toutes les paires (A_i^l, B_i^l) $(i = 1, 2, ..., J$ et $l = 1, 2, .., r_i)$ sont stabilisables.[8]

2. L'interconnection $f_{ij}(x_j(t))$ satisfait les conditions suivantes : $f_{ij}(x_j(t) = B_i^l f_{ij^l}(x_j(t)))$ et $\|f_{ij}^l(x_j(t))\| \leq \bar{f}_{ij}^l \|x_j(t)\|$, où $\bar{f}_{ii}^l = 0$, $\bar{f}_{ij}^l(i \neq j)$ est une constante positive et B_i^l est une matrice réelle avec des dimensions appropriées. [8]
3. Les capteurs sont commandés par une horloge, le contrôleur et les actionneurs sont pilotés par des événements.
4. Les données sont transmises dans un seul paquet, soit à partir de la mesure ou de la commande et les variables d'état sont mesurables.
5. L'effet de la quantification du signal et le mauvais code de communication ne sont pas pris en compte.
6. La commande réelle $u_i(t)$ pour chaque sous-système est réalisée grâce à un bloqueur d'ordre zéro.

Il est à noter que la période d'échantillonnage d'un capteur est pré-déterminée pour la conception d'algorithme de contrôle, et donc le capteur peut être supposé être commandé par une horloge. Toutefois, un dispositif d'action ne change pas sa sortie à partir du système sous le contrôle jusqu'à ce qu'un signal de commande mis à jour soit reçu, ce qui implique que l'actionneur est piloté par des événements.

Afin d'obtenir les principaux résultats de cette étude, les lemmes suivants sont nécessaires :

Lemme 1 *[5]* Pour tout vecteur réel ζ et ρ, il vient que

$$2\zeta^T \rho \leq \zeta^T Z \zeta + \rho^T Z^{-1} \rho \tag{4}$$

avec $Z > 0$

Lemme 2 *[8]* L'inégalité suivante est vérifiée pour tout vecteur réel $\nu_i \in R^n$

$$[\sum_{i=1}^{m} \nu_i]^T [\sum_{i=1}^{m} \nu_i] \leq m \sum_{i=1}^{m} \nu_i^T \nu_i. \tag{5}$$

3 Résultats principaux

Dans cette section, notre attention sera focalisée sur la synthèse d'un contrôleur retour d'état pour stabiliser le système. En effet, on suppose que les états du système (2) sont mesurables pour réaliser une commande par retour d'état, le schéma de commande de type PDC sera considéré pour chaque sous système S_i. Le contrôleur flou PDC global en réseau qui correspond à S_i peut être décrit comme suit :

$$u_i(t_k) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l(\theta_i(t_k)) K_i^l x_i(t_k - \tau_{ki}).$$

En utilisant le BOZ, le signal d'entrée pour chaque sous-système S_i pour $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ est donné par

$$u_i(t) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l(\theta_i(t_k)) K_i^l x_i(t_k - \tau_{ki}) \tag{6}$$

– Retard induit par le réseau (τ_{ki}) : Le retard induit par le réseau existe toujours quand la donnée est transmise à travers le réseau, et évidemment, il possède deux bornes supérieure et inférieure. Alors, une représentation claire du retard serait une fonction variant dans le temps. Une hypothèse naturelle de τ_{ki} peut être faite comme suit :

$$0 < \tau_{mi} \leq \tau_{ki} \leq \tau_{Mi} \tag{7}$$

– Paquets perdus : L'effet de paquets perdus dans la chaine de communication peut être décrit par le fait que le BOZ n'est pas mis à jour pendant l'intervalle de temps de cet évenement, qui est désigné comme l'échantillonnage vacant. Ainsi, l'effet de perte de paquet dans la transmission n'est qu'un cas où le délai d'une période d'échantillonnage est induite dans l'intervalle de la mise à jour du BOZ.

$$t_{k+1} - t_k = (\sigma_{ki+1} + 1)h + \tau_{ki+1} - \tau_{ki} \tag{8}$$

où h représente la période d'échantillonnage et σ_{ki+1} est le nombre de paquets perdus accumulés dans cette période. En utilisant les équations (2) et (6), le sous-système commandé en réseau en boucle fermée peut être écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A(t)x_i(t) + H(t)x_i(t_k - \tau_{ki}) \\ \qquad + f(x_i(t)),\ t_k \leq t \leq t_{k+1} \end{cases} \tag{9}$$

Avec

$$A(t) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l A_i^l,\ B(t) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l B_i^l,$$

$$H(t) = B(t) \sum_{s=1}^{r_i} h_i^s K_i^s,$$

$$f(x_i(t)) = \sum_{l=1}^{r_i} h_i^l \sum_{j=1}^{J} f_{ij}(x_j),$$

Soit $\eta_i(t) = t - t_k + \tau_{ki}, \quad t_k \leq t \leq t_{k+1}$, alors

$$\tau_{mi} \leq \tau_{ki} \leq \eta_i(t) \leq (\bar{\sigma}_i + 1)h + \tau_{ki+1} \tag{10}$$

Où $\bar{\sigma}_i$ représente le nombre maximum de paquets perdus dans les periodes de mise à jour, $\eta_{1i} = \tau_{mi}$ et $\eta_{2i} = (\bar{\sigma}_i + 1)h + \tau_{Mi}$. Ainsi nous obtenons à partir de [1] que

$$\eta_{1i} \leq \eta_i(t) \leq \eta_{2i}, \quad \dot{\eta}_i(t) \leq h_{di} \tag{11}$$

Comme $\sum_{k=0}^{\infty}[t_k, t_{k+1}) = [0, \infty)$, alors nous avons

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A(t)x_i(t) + H(t)x_i(t - \eta_i(t)) \\ \qquad + f(x_i(t)) \\ x_i(t) = \phi_i(t), t \in [t_0 - \eta_{2i}, t_0] \end{cases} \tag{12}$$

Où $\phi_i(t)$ peut être considérée comme la condition initiale du système de contrôle en boucle fermée. En prenant en compte (11), il est à noter que le NCS (12) est équivalent à un système avec un retard à temps variant. Dans cette section, nous allons présenter notre résultat principal basé sur l'analyse de la stabilité du système en boucle fermée contrôlé en réseau (12) en utilisant une fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii floue. D'où, la synthèse des contrôleurs K_i^s est développée par le Théorème suivant :

Théorème 1 Soient les scalaires $\eta_{1i} > 0, \eta_{2i} > 0$, μ_1, μ_2, et μ_3, le système en boucle fermée (12) est asymptotiquement stable , s'ils existent des matrices symétriques positives $\bar{P}_i$, $\bar{Q}_{1i}$, $\bar{Q}_{2i}$, $\bar{Q}_{3i}$, $\bar{Z}_{1i}$, $\bar{Z}_{2i}$ et des matrices $\bar{G}_i$ inversibles, et Y_i^s, $\bar{L}_i$, $\bar{W}_i$ avec des dimensions appropriées, vérifiant la condition suivante :

$$\bar{\Phi}_{ls} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{11il} & \bar{\Phi}_{12ijls} & \bar{Z}_{1i} + \eta_{ri}\bar{L}_{1i} & -\eta_{ri}\bar{W}_{1i} & \bar{\Phi}_{15il} & \bar{L}_{1i} & \bar{W}_{1i} & \bar{G}_i^T \\ * & \bar{\Phi}_{22ijls} & \eta_{ri}\bar{L}_{2i} & -\eta_{ri}\bar{W}_{2i} & \bar{\Phi}_{25ijls} & \bar{L}_{2i} & \bar{W}_{2i} & 0 \\ * & * & -\bar{Q}_{2i} - \bar{Z}_{1i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \bar{Q}_{3i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \bar{\Phi}_{55i} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \bar{\Phi}_{66i} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \bar{\Phi}_{77i} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & \bar{\Phi}_{88ij} \end{bmatrix} < 0 \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{11il} &= \bar{Q}_{1i} + \bar{Q}_{2i} + \bar{Q}_{3i} - \mu_1 sym(A_i^l \bar{G}_i) - \bar{Z}_{1i} - \mu_1^2 I, \\ \bar{\Phi}_{12ils} &= -\mu_2 \bar{G}_i^T (A_i^l)^T - \mu_1 B_i^l Y_i^s + \eta_{ri}(-\bar{L}_{1i} + \bar{W}_{1i}), \\ \bar{\Phi}_{22ils} &= -\mu_2 sym(B_i^l Y_i^s) - (1 - h_{di})\bar{Q}_{1i} \\ &\quad - \eta_{ri}(Sym(\bar{L}_{2i} - \bar{W}_{2i})) - \mu_2^2 I, \\ \bar{\Phi}_{15il} &= \bar{P}_i + \mu_1 \bar{G}_i - \mu_3 \bar{G}_i^T (A_i^l)^T, \\ \bar{\Phi}_{25ijls} &= \mu_2 \bar{G}_i - \mu_3 (Y_i^s)^T (B_i^l)^T, \\ \bar{\Phi}_{55i} &= \eta_{1i}^2 \bar{Z}_{1i} + \eta_{ri}^2 \bar{Z}_{2i} + \mu_3 sym(\bar{G}_i) - \mu_3^2 I, \\ \bar{\Phi}_{66i} &= (-\eta_{2i}\eta_{ri})^{-1}\bar{Z}_{2i},\ \bar{\Phi}_{77i} = (-\eta_{2i}\eta_{ri})^{-1}\bar{Z}_{2i}, \\ \bar{\Phi}_{88ij} &= (3J \sum_{j=1}^{J} \hat{f}_{ij}^2 \|\hat{B}_j\|^2)^{-1} I \\ \eta_{ri} &= \eta_{2i} - \eta_{1i},\ \hat{f}_{ij} = max_l \bar{f}_{ij}^l, \|\hat{B}_i\| = max_l \|B_i^l\|. \end{aligned}$$

avec $Y_i^s = K_i^s \bar{G}$.

Preuve 1 Soit la fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii donnée par $V = \sum_{i=1}^{J} v_i,\ i = 1, 2, ..., J$, où v_i représente la fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii correspondante au sous-système S_i. Chaque v_i est définie comme suit :

$$
\begin{aligned}
v_i(t) &= x_i^T(t)P_i x_i(t) + \int_{t-\eta_i(t)}^{t} x_i^T(s)Q_{1i}x_i(s)\,\mathrm{d}s \\
&+ \int_{t-\eta_{1i}}^{t} x_i^T(s)Q_{2i}x_i(s)\,\mathrm{d}s \\
&+ \int_{t-\eta_{2i}}^{t} x_i^T(s)Q_{3i}x_i(s)\,\mathrm{d}s \\
&+ \eta_{1i}\int_{-\eta_{1i}}^{0} \Big(\int_{t+s}^{t} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{1i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon\Big)\mathrm{d}s \\
&+ \eta_{ri}\int_{-\eta_{2i}}^{-\eta_{1i}} \Big(\int_{t+s}^{t} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{2i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon\Big)\mathrm{d}s
\end{aligned} \tag{14}
$$

$$
\begin{aligned}
\dot{v}_i(t) \le\; & 2\dot{x}_i^T(t)P_i x_i(t) + x_i^T(t)(Q_{1i}+Q_{2i}+Q_{3i})x_i(t) \\
& - (1-h_{di})x_i^T(t-\eta_i(t))Q_{1i}x_i(t-\eta_i(t)) \\
& - x_i^T(t-\eta_{1i})Q_{2i}x_i(t-\eta_{1i}) \\
& - x_i^T(t-\eta_{2i})Q_{3i}x_i(t-\eta_{2i}) \\
& + \dot{x}_i^T(t)(\eta_{1i}^2 Z_{1i} + \eta_{ri}^2 Z_{2i})\dot{x}_i(t) \\
& - \eta_{1i}\int_{t-\eta_{1i}}^{t} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{1i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon \\
& - \eta_{ri}\int_{t-\eta_{2i}}^{t-\eta_{1i}} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{2i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon
\end{aligned} \tag{15}
$$

Notons $\psi_{1i} = x_i(t) - x_i(t-\eta_{1i})$, $\psi_{2i} = x_i(t-\eta_{1i}) - x_i(t-\eta_i(t))$ et $\psi_{3i} = x_i(t-\eta_i(t)) - x_i(t-\eta_{2i})$, en appliquant l'inégalité de Jensen, nous trouvons

$$
-\eta_{1i}\int_{t-\eta_{1i}}^{t} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{1i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon \le -\psi_{1i}^T Z_{1i}\psi_{1i} \tag{16}
$$

D'autre part, en utilsant le Lemme 1 nous avons :

$$
\begin{aligned}
& -2\Psi_i^T(t)L_i\int_{t-\eta_i(t)}^{t-\eta_{1i}} \dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \\
& \le \eta_i(t)\Psi_i^T(t)L_iZ_{2i}^{-1}L_i^T\Psi_i(t) \\
& + \int_{t-\eta_i(t)}^{t-\eta_{1i}} \dot{x}_i^T(\alpha)Z_{2i}\dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \\
& \le \eta_{2i}\Psi_i^T(t)L_iZ_{2i}^{-1}L_i^T\Psi_i(t) + \int_{t-\eta_i(t)}^{t-\eta_{1i}} \dot{x}_i^T(\alpha)Z_{2i}\dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha
\end{aligned} \tag{17}
$$

et

$$
\begin{aligned}
& -2\Psi_i^T(t)W_i\int_{t-\eta_{2i}}^{t-\eta_i(t)} \dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \\
& \le (\eta_{2i}-\eta_i(t))\Psi_i^T(t)W_iZ_{2i}^{-1}W_i^T\Psi_i(t) \\
& + \int_{t-\eta_{2i}}^{t-\eta_i(t)} \dot{x}_i^T(\alpha)Z_{2i}\dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha \\
& \le \eta_{2i}\Psi_i^T(t)WZ_{2i}^{-1}W_i^T\Psi_i(t) + \int_{t-\eta_{2i}}^{t-\eta_i(t)} \dot{x}_i^T(\alpha)Z_{2i}\dot{x}_i(\alpha)\,\mathrm{d}\alpha
\end{aligned} \tag{18}
$$

D'où

$$
\begin{aligned}
& -\eta_{ri}\int_{t-\eta_{2i}}^{t-\eta_{1i}} \dot{x}_i^T(\upsilon)Z_{2i}\dot{x}_i(\upsilon)\,\mathrm{d}\upsilon \\
& \le \eta_{ri}\Big(\eta_{2i}\dot{x}_i^T(t)Z_{2i}\dot{x}(t) + \eta_{2i}\Psi_i^T(t)L_iZ_{2i}^{-1}L_i^T\Psi_i(t) \\
& + \eta_{2i}\Psi_i^T(t)W_iZ_{2i}^{-1}W_i^T\Psi_i(t) \\
& + 2\Psi_i^T(t)L_i\begin{bmatrix}0 & -I & I & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\Psi_i(t) \\
& + 2\Psi_i^T(t)W_i\begin{bmatrix}0 & I & 0 & -I & 0 & 0\end{bmatrix}\Psi_i(t)\Big)
\end{aligned} \tag{19}
$$

A partir de (12) et pour toute matrice de dimension appropriée G_i, nous avons l'équation nulle suivante

$$
\begin{aligned}
& 2\big[x_i^T(t)G_{1i}^T + x_i^T(t-\eta_i(t))G_{2i}^T + \dot{x}_i^T(t)G_{3i}^T\big] \\
& \times\big[\dot{x}_i(t) - A(t)x_i(t) - H(t)x(t-\eta_i(t)) - f(x_i(t))\big] = 0
\end{aligned} \tag{20}
$$

où $L_i = \begin{bmatrix}L_{1i}^T & L_{2i}^T & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$, $W = \begin{bmatrix}W_{1i}^T & W_{2i}^T & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$ *et* $\Psi_i^T(t) = \begin{bmatrix}x_i^T(t) & x_i^T(t-\eta_i(t)) & x_i^T(t-\eta_{1i}) & x_i^T(t-\eta_{2i}) & \dot{x}_i^T(t)\end{bmatrix}$.
Basée sur les Lemmes 1, 2, l'hypothèse 1, et l'hypothèse 2, et en définissant $\hat{f}_{ij} = max_l \bar{f}_{ij}^l$ et $\|\hat{B}_i\| = max_l\|B_i^l\|$, et soient, $G_{1i} = \mu_1 G_i$, $G_{2i} = \mu_2 G_i$, et $G_{3i} = \mu_3 G_i$, avec μ_1, μ_2, μ_3 des scalaires positifs, la dérivée (14) au long de la trajectoire du système en boucle fermée (12) peut s'écrire comme suit

$$
\dot{V} = \sum_{i=1}^{J}\dot{v}_i \le \sum_{i=1}^{J}\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{r_i}\sum_{s=1}^{r_i} h_i^l h_i^s \;\Psi_i^T(t)\bar{\Gamma}_{ls}\Psi_i(t)
$$

Où $\bar{\Gamma}_{ls} = \Phi_{ls} + \eta_{2i}L_iZ_{2i}^{-1}L_i^T + \eta_{2i}W_iZ_{2i}^{-1}W_i^T$

$$
\Phi_{ls} = \begin{bmatrix}
\Phi_{11ijls} & \Phi_{12ils} & Z_{1i}+\eta_{ri}L_{1i} & -\eta_{ri}W_{1i} & \Phi_{15il} \\
* & \Phi_{22ils} & \eta_{ri}L_{2i} & -\eta_{ri}W_{2i} & \Phi_{25ijls} \\
* & * & -Q_{2i}-Z_{1i} & 0 & 0 \\
* & * & * & Q_{3i} & 0 \\
* & * & * & * & \Phi_{55i}
\end{bmatrix} \tag{21}
$$

$$\Phi_{11ijl} = Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i} - sym(G_{1i}^T A_i^l) - Z_{1i} - G_{1i}^T G_{1i} - \sum_{j=1}^{J} f_{ij}(x_j(t))^T \sum_{j=1}^{J} f_{ij}(x_j(t)),$$
$$\Phi_{12ils} = -(A_i^l)^T G_{2i} - G_{1i}^T B_i^l K_i^s + \eta_{ri}(-L_{1i} + W_{1i}),$$
$$\Phi_{22ils} = -sym(G_{2i}^T B_i^l K_i^s) - (1 - h_{di})Q_{1i} - G_{2i}^T G_{2i} - \eta_{ri}(Sym(L_{2i} - W_{2i})),$$
$$\Phi_{15il} = P_i + G_{1i}^T - (A_i^l)^T G_{3i},$$
$$\Phi_{25ijls} = G_{2i}^T - (K_i^s)^T (B_i^l)^T G_{3i},$$
$$\Phi_{55i} = \eta_{1i}^2 Z_{1i} + \eta_{ri}^2 Z_{2i} + sym(G_{3i}) - G_{3i}^T G_{3i}$$

Sous les conditions du Théorème 1, une solution est faisable si et seulement si la condition $\bar{\Phi}_{55i} < 0$ est satisfaite, ce qui implique que $\bar{G}_i$ est inversible. Définissons $G_i = \bar{G}_i^{-1}$, $\bar{P}_i = \bar{G}_i^T P_i \bar{G}_i$, $\bar{Q_{1i}} = \bar{G}^T Q_{1i} \bar{G}_i$, $\bar{Q_{2i}} = \bar{G}^T Q_{2i} \bar{G}_i$, $\bar{Q_{3i}} = \bar{G}^T Q_{3i} \bar{G}_i$, $\bar{Z_{1i}} = \bar{G}^T Z_{1i} \bar{G}_i$, $\bar{Z_{2i}} = \bar{G}^T Z_{2i} \bar{G}_i$ $\bar{L_{1i}} = \bar{G}^T L_{1i} \bar{G}_i$, $\bar{L_{2i}} = \bar{G}^T L_{2i} \bar{G}_i$ $\bar{W_{1i}} = \bar{G}^T W_{1i} \bar{G}_i$,et $\bar{W_{2i}} = \bar{G}^T W_{2i} \bar{G}_i$. En appliquant la transformation de congruence à (13) par $diag\{G_i, G_i, G_i, G_i, G_i, G_i, G_i, G_i\}$, et en utilisant le complément de schur, nous obtenons $\bar{\Gamma}_{ls} < 0$. Par conséquent, nous avons $\dot{V}(x(t)) < 0$ si $h_i^l \geq 0$, donc, le système (12) est asymptotiquement stable.

4 Résultats de simulation

Pour illustrer la méthode proposée, nous considérons l'exemple donné dans [8], composé par trois sous-systèmes flous S_i, $i = 1, 2, 3$, comme suit, dans lequel chaque état de chaque sous-système possède deux dimensions. Les fonctions d'appartenance pour chaque état sont montrées dans la figure 1 de l'article [8]. Les paramètres liés au réseau pour chaque sous-système S_i sont supposés égal à : $h = 5ms$, le retard mimimum $\eta_{1i} = 6ms$, le retard maximum $\eta_{2i} = 20ms$ et le nombre maximum de pertes de paquets est $\bar{\sigma}_i = 3$. Les retards variables entre les capteurs et les contrôleurs aussi bien entre contrôleurs et actionneurs sont générés aléatoirement tels que $\min(\tau_{sci} + \tau_{cai}) \geq \eta_{1i}$, et $\max(\tau_{sci} + \tau_{cai} + (\bar{\sigma}_i + 1)h) \leq \eta_{2i}$ et les pertes de paquets sont aussi générés aléatoirement tel que $max(Ne) \leq 3$, où Ne est le nombre de pertes de paquets, $h_{di} = 0.1$, $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 0.5$ et $\mu_3 = 0.9$.

En appliquant le Théorème 1, les solutions des LMIs peuvent être obtenues comme suit :

$K_1^1 = \begin{bmatrix} -10.9839 & -6.8409 \end{bmatrix}$, $K_1^2 = \begin{bmatrix} -2.9569 & -1.6003 \end{bmatrix}$, $K_1^3 = \begin{bmatrix} -1.3481 & -0.6249 \end{bmatrix}$ pour le sous-système S1, $K_2^1 = \begin{bmatrix} -0.8492 & -3.0854 \end{bmatrix}$, $K_2^2 = \begin{bmatrix} -1.4386 & -0.7997 \end{bmatrix}$ pour le sous-système S2, et $K_3^1 = \begin{bmatrix} -1.2208 & -1.8195 \end{bmatrix}$, $K_3^2 = \begin{bmatrix} -2.8164 & -2.9984 \end{bmatrix}$ pour le sous-système S3.

Pour la simulation, les conditions initiales sont $x_1(0) = \begin{bmatrix} 1.5 & -1 \end{bmatrix}^T$, $x_2(0) = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}^T$, et $x_3(0) = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}^T$. L'évolution des variables d'états des systèmes NCSs et les entrées de commande sont illustrées dans les figures 2, 3, 4 et 5 à partir des quelles nous pouvons constater que tous les états convergent vers zéro et les retards introduits par le réseau et les pertes de paquets de données sont générés aléatoirement et sont montrés dans les figures 6 et 7. Par conséquent, selon le Théorème 1, le système global flou de grande dimension en boucle fermée composé de trois sous-systèmes S1, S2 et S3 est asymptotiquement stable. Les résultats de simulation sont conformes avec l'analyse et soutiennent l'efficacité de la stratégie de synthèse développée.

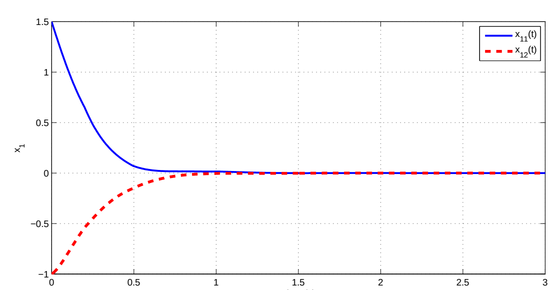

Figure 2 – Réponse de l'état x dans S_1

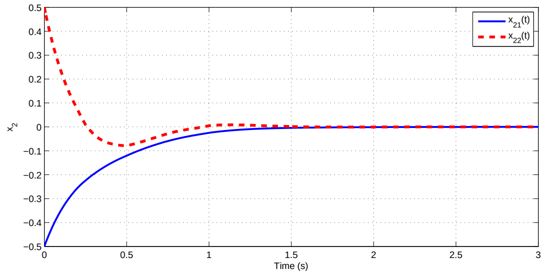

Figure 3 – Réponse de l'état x dans S_2 .

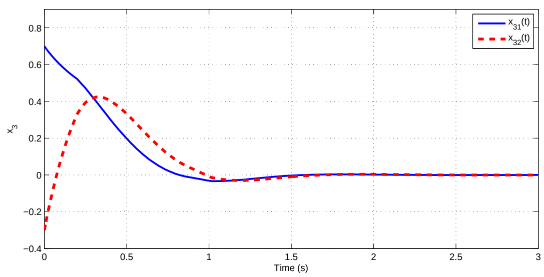

Figure 4 – Réponse de l'état x dans S_3 .

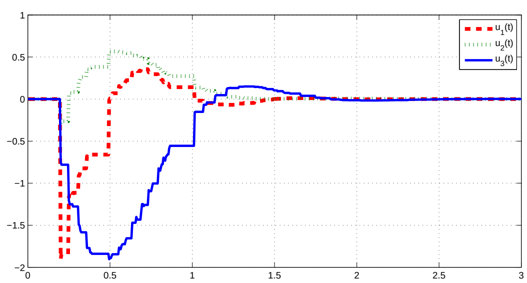

Figure 5 – Trajectoires des signaux de commandes $u_i(t)$.

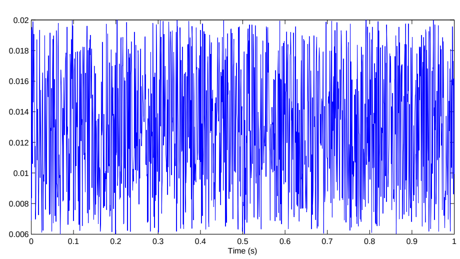

Figure 6 – Retard induit par le réseau.

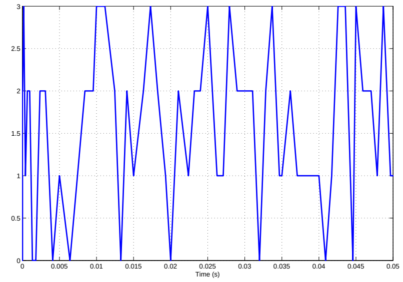

Figure 7 – Pertes de paquets de données.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode de synthèse du contrôleur flou de type PDC pour le système de grande dimension commandé en réseau en considérant le retard et les pertes de paquets dans la communication en réseau. Nous avons montré que le retard optimal admissible dans le réseau et les gains du contrôleur peuvent être déterminés en résolvant un ensemble de contraintes LMIs. Un exemple numérique ainsi que des résultats de simulation sont présentés pour valider l'approche proposée.

Références

[1] JM Gomes da Silva Jr, Alexandre Seuret, Emilia Fridman, and Jean-Pierre Richard. Stabilisation of neutral systems with saturating control inputs. *International Journal of Systems Science*, 42 :1093–1103, 2011.

[2] Scorletti G and Duc G. An lmi approach to decentralized H_∞ control. *Int J Control*, 74 :211224, 2001.

[3] Park JH. Design of robust decentralized dynamic controller for uncertain large-scale interconnected systems with time delays. *IEICE Trans Fundam Electron Commun Comput Sci*, page 17471754, 2001.

[4] Park JH. Robust nonfragile decentralized controller design for uncertain large-scale interconnected systems with time delays.

Trans ASME J Dyn Syst Meas Control, 124 :332336, 2002.

[5] C. Latrach, M. Kchaou, A. Toumi, and A. El Hajjaji. Robust stabilization for continuous fuzzy systems with time varying delay. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*, pages 1411–1416, 2011.

[6] Chen Peng, Yu-Chu Tian, Moses, and O TadState feedback controller design of networked control systems with interval time-varying delay and nonlinearity. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 18 :1285–1301, 2008.

[7] Y. Shi, H. Fang, and M. Yan. Kalman filter-based adaptive control for networked systems with unknown parameters and randomly missing outputs. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 19 :1976–1992, 2008.

[8] Wen-June Wang and Wei-Wei Lin. Decentralized pdc for large -scale T-S fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 13 :779–786, 2005.

[9] Jing Wu, Liqian Zhang, and Tongwen Chen. Model predictive control for networked control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 19 :1016–1035, 2009.

[10] Ligang Wu, James Lam, Xiuming Yao, and Junlin Xiong. Robust guaranteed cost control of discrete-time networked control systems. *Optimal control applications and methods*, 32 :95–112, 2010.

[11] Xiaoshi Xiao and Zhizhong Mao. Decentralized guaranteed cost stabilization of time-delay large-scale systems based on reduced-order observers. *Journal of the Franklin Institute*, 348 :26892700, 2011.

[12] Hongjiu Yang, Yuanqing Xia, and Peng Shi. Stabilization of networked control systems with nonuniform random sampling periods. *International Journal Of Robust And Nonlinear Control*, 21 :501–526, 2010.

[13] Bo Yu, Yang Shi, and Yang Lin. Discrete-time H_2 output tracking control of wireless networked control systems with markov communication models. *Wireless communications and mobile computing*, 11 :1107–1116, 2009.

[14] Hui Zhang, Yang Shi, and Aryan Saadat Mehr. Robust weighted H_∞ filtering for networked systems with intermittent measurements of multiple sensors. *International Journal of adaptative control and signal processing*, 25 :313–330, 2011.