

Transformer les retards de transport variables en retards fixes : Une application au problème du convoyeur

Transforming variable transport delays into fixed ones: An application to a conveyor belt problem

T. Laurain, J. Lauber¹

Zs. Lendek²

R. Palhares³

¹ LAMIH UMR CNRS 8201, University of Valenciennes, France

² Department of Automation, Technical University of Cluj-Napoca, Romania

³ Department of Electronics Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil

{thomas.laurain; jimmy.lauber}@univ-valenciennes.fr

zsofia.lendek@aut.utcluj.ro

rpalhares@ufmg.br

Résumé :

Ce papier présente une méthodologie systématique pour gérer les retards de transport variables en construisant un nouveau domaine discret où le retard de transport variable devient fixe (une différence d'instants). La transformation d'Euler est utilisée pour passer du domaine continu à ce domaine discret spécial qui dépend de la même variable que le retard de transport. Après cette transformation, le modèle devient non-linéaire et la représentation floue Takagi-Sugeno est obtenue pour inclure les non-linéarités dans le design. Pour souligner et illustrer l'efficacité de la méthodologie proposée, un contrôleur est synthétisé à base de LMI commander un convoyeur avec un retard de transport variable.

Mots-clés :

Retard de transport variable ; domaine dépendant d'une variable ; contrôle discret basé sur un modèle ; représentation Takagi-Sugeno ; convoyeur

Abstract:

This paper presents a systematic methodology to deal with variable transport delays by constructing a new discrete domain where the variable transport delay becomes fixed (a difference of samples). The Euler transformation is used to change from the continuous-time domain to this special discrete domain depending on the same variable as the transport delay. After this transformation, the model becomes nonlinear and the Takagi-Sugeno fuzzy representation is obtained to handle the nonlinearities. To highlight and illustrate the efficiency of the proposed methodology, a LMI based controller design is developed to control a conveyor belt with variable transport delay.

Keywords:

Variable transport delay; variable-dependent domain; discrete model-based control; Takagi-Sugeno representation; conveyor belt

1 Introduction

Les retards variables dans le temps représentent un problème majeur d'un point de vue du contrôle. Les retards sont naturellement présents dans diverses applications industrielles. Il existe une large littérature concernant les retards fixes connus avec différents types de stratégies. Dans le domaine fréquentiel, un prédicteur de Smith peut être appliqué. Dans l'espace d'état et en présence de retards constants (connus ou non), les méthodes sont basées sur les théories de Lyapunov-Krasovskii et de Lyapunov-Razumikhin. Trouver des conditions de stabilité pour les systèmes à retards fixes a été étudié dans [1]–[3] avec des inégalités matricielles. Les systèmes retardés ont souvent des non-linéarités, donc la représentation Takagi-Sugeno (TS) est considérée [4], [5]. Dans [6], un filtre est construit pour estimer les états retardés incertains afin de concevoir un contrôleur robuste. Cette recherche est motivée par les conditions de stabilité des systèmes avec retards variables ou inconnus [7], [8] et les applications où les retards

variables impliquent des lois de commande plus complexes [9].

Ce papier distingue les cas des retards variables de transport et temporels. Un retard temporel variable est un retard dépendant directement du temps. Un retard de transport variable est un retard apparaissant par exemple quand une certaine distance doit être parcourue à une vitesse variable. Donc, le retard ne dépend pas directement du temps, mais d'une grandeur variable en fonction du temps. Ce papier se focalise sur la deuxième catégorie.

Les retards de transport variables sont naturellement présents dans de nombreux systèmes. [10] présente différentes sources de retard : un transfert entre deux processus industriels, un tuyau inextensible qui conduit un flux, la position éloignée d'un capteur etc... La simulation, la modélisation et le contrôle en présence de retards de transport variables ont été traités dans la littérature applicative. Des exemples peuvent être trouvés dans les applications maritimes pour refroidir les moteurs [11], les problèmes d'irrigation [12], les systèmes de chauffage [13], [14], les systèmes de collecte d'énergie solaire [15] ou le contrôle de la richesse d'un moteur où le capteur est situé dans le collecteur d'échappement [16], [17].

L'application considérée dans ce papier est le convoyeur. Ce système est utilisé en industrie pour transporter des matériaux d'un point A à un point B. Un retard de transport est naturellement présent et dépend de la vitesse du moteur conduisant le convoyeur. Les études récentes de la littérature se focalisent principalement sur le contrôle de la vitesse du moteur du convoyeur [18]–[22].

Ce papier présente une transformation originale dans un domaine discret où la période d'échantillonnage est fonction des variables de transport. Dans ce nouveau domaine, le retard de transport variable est exprimé comme étant fixe (dépendant de différents échantillons). Puis, parce que le modèle devient non-linéaire, la représentation floue de type Takagi-Sugeno est utilisée au lieu de linéariser et un contrôleur par retour d'état est développé.

Ce papier a la structure suivante : La Section 2 détaille les notations et quelques préliminaires. La Section 3 présente la contribution principale, incluant la transformation pour rendre le retard de transport variable fixe et le design du contrôleur. La Section 4 fournit un exemple applicatif avec le convoyeur qui illustre l'intérêt de la méthodologie. Finalement, la Section 5 conclut le papier.

2 Préliminaires

2.1 Notations

Au long de ce papier, la notation suivante est utilisée : $x(t)$ représente l'état dans le domaine temporel, $x(k)$ l'état dans le domaine discret et $x^\theta(k)$ l'état dans le domaine donné par la grandeur variable $\theta(t)$.

I dénote la matrice identité et $(*)$ représente le terme symétrique du membre de gauche.

2.2 Formulation du retard de transport variable

Considérons la représentation d'état linéaire dans le domaine temporel avec un retard sur l'entrée :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \delta(t)) \quad (1)$$

où A est la matrice de la dynamique du système, B est la matrice d'entrée et $\delta(t)$ est le retard de transport variable, qui dépend d'une variable externe θ .

Remarque 1: La contribution principale peut être étendue au cas où le retard porte à la fois sur l'entrée et sur l'état, et pour différents types de retard, mais pour des raisons de simplicité, dans ce papier nous nous concentrons sur un seul retard de transport sur l'entrée.

Le retard de transport variable est souvent une fonction dépendant d'une variable et de sa dérivée temporelle, par exemple dans le cas du

convoyeur, diviser des mètres (la longueur) par la vitesse linéaire en mètres par seconde permet d'avoir un retard en secondes. Introduisons la variable $\theta(t)$ et sa dérivée temporelle notée $\dot{\theta}(t)$. Le retard de transport variable peut être exprimé comme :

$$\delta(\dot{\theta}(t)) = \frac{\theta_{fix}}{\dot{\theta}(t)} \quad (2)$$

où $\delta(\dot{\theta}(t))$ est le retard de transport variable. θ_{fix} représente une valeur fixe de la variable $\theta(t)$, dépendant de l'application. Par exemple, cela peut être la longueur du tuyau, la longueur du convoyeur, la position du capteur, etc... Ainsi, l'équation (1) peut être écrite comme

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \delta(\dot{\theta}(t))) \quad (3)$$

3 Contribution principale

3.1 Transformation dans un nouveau domaine

Etant donné que le retard variable n'est pas facile à gérer, l'idée principale est de transformer l'équation du système (3) dans un domaine dans lequel le retard $\delta(\dot{\theta})$ devient fixe. Comme présenté dans l'équation (2), le retard est une fonction de la variable $\dot{\theta}(t)$. Considérons le domaine associé à la variable θ . Ainsi, $\dot{x}(t)$ peut être exprimé comme :

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{d\theta(t)} \times \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{dx(t)}{d\theta(t)} \times \dot{\theta}(t) \quad (4)$$

où $\theta(t)$ est la variable du nouveau domaine. Une telle transformation est souvent utilisée en contrôle moteur pour aller dans le domaine de l'angle vilebrequin [23], [24]. La dérivée de l'état $x(t)$ selon $\theta(t)$ peut être obtenue de l'équation (4):

$$\frac{dx(t)}{d\theta(t)} = \frac{1}{\dot{\theta}(t)} \frac{dx(t)}{dt} \quad (5)$$

Afin de convertir le domaine temporel en ce domaine discret spécifique en θ , une discrétisation est réalisée en utilisant l'approximation d'Euler.

$$\frac{dx(t)}{d\theta(t)} \approx \frac{x^\theta(k+1) - x^\theta(k)}{T_s^\theta} \quad (6)$$

où T_s^θ est la valeur d'échantillonnage dans le domaine θ , qui doit être choisie en prenant en compte que T_s^θ doit être suffisamment petit pour ne pas perdre d'information pendant la discrétisation. En combinant (5) et (6), il est possible de déduire la loi récursive entre deux échantillons du domaine θ :

$$x^\theta(k+1) \approx x^\theta(k) + \frac{T_s^\theta}{\dot{\theta}(k)} \frac{dx^\theta(k)}{dt} \quad (7)$$

3.2 Fixer le retard

Maintenant que le domaine θ est construit et que la loi de transformation (7) est définie, la représentation d'état dynamique continue (3) devient dans le nouveau domaine

$$x^\theta(k+1) = x^\theta(k) + \mathcal{G} \cdot \Lambda \quad (8)$$

où $\mathcal{G} = \frac{T_s^\theta}{\dot{\theta}(k)}$, $x^\theta(k)$ est l'état exprimé dans le nouveau domaine θ à l'instant k , $x^\theta(k+1)$ le vecteur d'état à l'échantillon suivant d'après T_s^θ et $\Lambda = Ax^\theta(k) + Bu^\theta(k - \Upsilon(\delta(\dot{\theta})))$. u^θ est l'entrée de contrôle dans le nouveau domaine θ , et $\Upsilon(\cdot)$ la fonction qui transforme le retard variable $\delta(\dot{\theta})$ en un retard exprimé dans la même unité que θ . Par conséquent, afin de respecter les unités, la fonction $\Upsilon(\cdot)$ peut être définie comme :

$$\Upsilon(\delta(\dot{\theta})) = \dot{\theta} \times \delta(\dot{\theta}) \quad (9)$$

avec $\dot{\theta}$ en $[\theta \text{ unit} \times s^{-1}]$ et $\delta(\dot{\theta})$ en $[s]$. Ainsi, l'étape suivante pour fixer le retard est de définir la valeur d'échantillonnage T_s^θ telle que :

$$k - \Upsilon(\delta(\dot{\theta})) = k - T_s^\theta \times \mu \quad (10)$$

où μ est un entier choisi et représentant le retard en terme de nombres d'échantillons. Ainsi, en combinant (9) et (10), l'expression suivante est obtenue pour T_s^θ :

$$T_s^\theta = \frac{\dot{\theta} \times \delta(\dot{\theta})}{\mu} \quad (11)$$

3.3 Design du contrôleur

Grâce à la transformation proposée, et en choisissant une valeur T_s^θ appropriée en utilisant l'équation (11), le retard variable $\delta(\dot{\theta})$ devient fixe dans le domaine θ et égale à μ échantillons :

$$x^\theta(k+1) = x^\theta(k) + \frac{T_s^\theta}{\dot{\theta}(k)} (Ax^\theta(k) + Bx^\theta(k-\mu)) \quad (12)$$

Cependant, deux choses sont importantes à considérer avec cette transformation. D'abord, d'un point de vue applicatif, le choix de T_s^θ est souvent grandement dépendant des capteurs. Deuxièmement, même si le système continu considéré (1) est un système linéaire très simple, de par cette transformation et le terme $\frac{T_s^\theta}{\dot{\theta}(k)}$, le système devient non-linéaire dans le domaine θ .

Dans la littérature, plusieurs méthodes existent pour traiter les non-linéarités. La plus simple consiste à linéariser le modèle à plusieurs points de fonctionnement. Au lieu d'utiliser cette méthodologie qui ne garantit pas la stabilité dans les phases transitoires, la représentation floue de type Takagi-Sugeno (TS) [25] est utilisée.

Les modèles TS consistent en une collection de sous-systèmes linéaires connectés ensemble

par des fonctions non-linéaires h_i appelées « fonctions d'appartenance ». Ces fonctions doivent vérifier la propriété de somme convexe :

$$h_i(z(k)) > 0, \quad \sum_{i=1}^r h_i(z(k)) = 1 \quad (13)$$

où r est le nombre de modèles locaux.

La décomposition en secteurs non-linéaires pour obtenir les modèles TS a l'avantage de fournir une représentation exacte du système non-linéaire à l'intérieur d'un domaine de validité. La transformation vers le modèle flou n'est pas détaillée dans ce papier et le lecteur intéressé peut se référer à [26]. Un modèle TS équivalent à (12) dans le domaine θ peut être exprimé comme :

$$x^\theta(k+1) = \sum_{i=1}^r h_i(k) (M_i x^\theta(k) + N_i v(k)) \quad (14)$$

où $v(k) = u^\theta(k-\mu)$ et h_i sont les fonctions d'appartenance précédemment décrites et les matrices M_i et N_i les sous-systèmes linéaires dépendant des bornes du domaine de validité. La notation est simplifiée pour le reste du papier, et la matrice floue M_z est utilisée pour

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(k)) M_i \quad \text{et} \quad M_{z-1} \quad \text{pour} \quad \sum_{i=1}^r h_i(z(k-1)) M_i. \text{ Ainsi, (14) devient:}$$

$$x^\theta(k+1) = M_z x^\theta(k) + N_z u^\theta(k-\mu) \quad (15)$$

Un contrôleur flou peut être développé. Par exemple, le plus simple consiste en un retour d'état incluant les fonctions d'appartenance, qui est appelé Compensation Parallèle Distribuée (PDC en anglais) [27]:

$$u^\theta(k) = -F_z x^\theta(k) \quad (16)$$

où F_z est le gain du contrôleur, somme de matrices linéaires combinées avec les fonctions d'appartenance. Ainsi, en appliquant la loi de contrôle (16) au système TS (15), le système en boucle fermée est :

$$x^\theta(k+1) = M_z x^\theta(k) - N_z F_{z-\mu} x^\theta(k-\mu) \quad (17)$$

pour lequel le résultat suivant peut être établi :
Théorème 1: Considérons le modèle Takagi-Sugeno (15) et la loi de contrôle (16). Le système en boucle fermée (17) est asymptotiquement stable s'il existe des matrices L , Y , M_{2zz} , S_z telles que :

$$\Gamma_{zz} < 0 \quad (18)$$

avec:

$$\Gamma_{zz} = \begin{bmatrix} -L & (*) & (*) & (*) & (*) \\ L & -Y & (*) & (*) & (*) \\ M_z L & 0 & \Omega_{zz} & (*) & (*) \\ 0 & 0 & W_{2zz}^T & -L & (*) \\ M_z L & 0 & J_{zz}^T & 0 & R_{zz} \end{bmatrix} \quad (19)$$

où $J_{zz} = -S_z^T N_z^T - W_{2zz}^T$, $\Omega_{zz} = -W_{2zz} - W_{2zz}^T$,
 $R_{zz} = -N_z S_{z-\mu} + (*) - Y$ et $(*)$ est le terme symétrique du membre de gauche et les termes déduits de symétrie dans les matrices.

Remarque 2: Les relaxations classiques ne peuvent pas être utilisées à cause de $z(k-\mu)$ et donc l'inégalité (18) doit être vérifiée $\forall i, j$.

Preuve: Considérons la fonction de Lyapunov :
 $V(k) = x^\theta(k)^T P x^\theta(k) + \sum_{i=k-\mu}^{k-1} x^\theta(i)^T Q x^\theta(i)$ (20)

Alors, la différence $\Delta V = V(k+1) - V(k) < 0$ peut être écrite comme :

$$X^T \Psi X < 0 \quad (21)$$

Avec $\Psi = \begin{bmatrix} -P + Q & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & -Q \end{bmatrix}$ et

$X = [x^\theta(k) \quad x^\theta(k+1) \quad x^\theta(k-\mu)]^T$. Le système en boucle fermé peut également être écrit comme :

$$\begin{bmatrix} M_z & -I & -N_z F_{z-\mu} \end{bmatrix} X = 0 \quad (22)$$

Il est possible d'utiliser le lemme de Finsler [29] pour obtenir :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ W_{2zz}^{-1} \\ Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_z & -I & -N_z F_{z-\mu} \end{bmatrix} + (*) + \Psi < 0 \quad (23)$$

où $(*)$ est le terme symétrique du membre de gauche. Alors, une transformation de congruence est appliquée avec la matrice $\text{diag}(L, W_{2zz}, Y)$ où $L = P^{-1}$ et $Y = Q^{-1}$, le changement de variable $S_{z-\mu} = F_{z-\mu} Y$ et les compléments de Schur sur les termes (1,1) et (2,2) mènent à la quantité précédemment définie (19).

4 Application au système du convoyeur

Le convoyeur est une application industrielle très répandue où un retard de transport apparaît. Le retard dépend de la longueur du convoyeur et de la vitesse du moteur. La méthodologie proposée est utilisée pour construire un nouveau domaine où le retard est fixe et pour contrôler le système.

4.1 Modèle dynamique du convoyeur

Présentons d'abord le système considéré et les équations dynamiques. Fig. 1 représente le système du convoyeur :

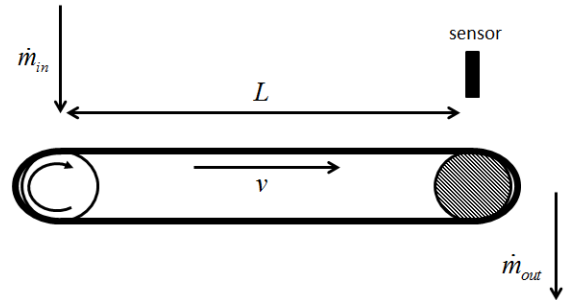


Figure 1 – Modélisation du convoyeur

où \dot{m}_{in} et \dot{m}_{out} sont respectivement les débits entrant et sortant du convoyeur (g/s). v est la vitesse linéaire du convoyeur (m/s). Le convoyeur est long de $L=10m$ et large de $l=1m$. Le capteur mesure la hauteur H de la matière présente sur le convoyeur (m). Le problème de commande est de réguler la hauteur en contrôlant le débit entrant. La vitesse du convoyeur est considérée comme une perturbation. Basé sur la littérature,

comme le modèle de moisissure de [18], un modèle du premier ordre de la variation de la hauteur est établi, en considérant le débit entrant, la vitesse du convoyeur et la dynamique du capteur :

$$\frac{dH(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}H(t) + \frac{1}{\tau\rho l} \frac{\dot{m}_{in}(t-\delta)}{v(t-\delta)} \quad (24)$$

Dans (24), τ est la constante de temps du capteur (0.2s) et ρ est la masse volumique de la matière (g/m³) Considérons la simulation d'un convoyeur transportant du quinoa bio. La masse volumétrique du quinoa est $\rho = 714.2857$. Le retard de transport variable δ dépend de la vitesse du convoyeur :

$$\delta(v(t)) = \frac{l}{v(t)} \quad (25)$$

La représentation d'état comme (3) est réalisée avec (24):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-\delta) \quad (26)$$

avec $x(t) = H(t)$, $A = -\frac{1}{\tau}$ et $B = \frac{K}{\tau} \frac{1}{v(t-\delta)}$,

avec $K = \frac{1}{\rho l}$.

4.2 Transformation dans le nouveau domaine

D'après l'expression du retard de transport variable δ donné en (25), le retard dépend de la vitesse du convoyeur $v(t)$, donc $\dot{\theta}(t) = v(t)$. Ainsi, θ est la distance parcourue par le convoyeur. La transformation est appliquée pour aller du domaine continu au domaine discret particulier :

$$x^\theta(k+1) = x^\theta(k) + \frac{T_s^\theta}{v(k)} \frac{dx(k)}{dt} \quad (27)$$

Afin d'obtenir T_s^θ en mètres, considérons le retard discrétisé égal à $\mu = 10$. Ainsi, en utilisant (11), on a :

$$T_s^\theta = \frac{\dot{\theta} \times \delta(\dot{\theta})}{\mu} = \frac{l}{10} = 1m \quad (28)$$

Par conséquent, dans ce nouveau domaine métrique mis à jour chaque mètre, le retard de transport variable devient fixe (égal à 10 échantillons). Désormais, pour le design du contrôle, convertissons le système d'état (26) dans le nouveau domaine :

$$x^\theta(k+1) = Ax^\theta(k) + Bu(k-10) \quad (29)$$

$$A = 1 - NL_1 \times \frac{1}{\tau} \quad \text{et} \quad B = NL_2 \times \frac{K}{\tau} \quad \text{où}$$

$$NL_1 = \frac{T_s^\theta}{v(k)} \quad \text{et} \quad NL_2 = \frac{T_s^\theta}{v(k) \cdot v(k-\mu)}. \quad \text{Les}$$

bornes sont choisies telles que $v(k) \in [3;5]$.

L'équation (29) peut être écrite comme :

$$x^\theta(k+1) = \sum_{i=1}^4 h_i(k) (A_i x^\theta(k) + B_i u(k-10)) \quad (30)$$

En résolvant les conditions LMI présentées dans le Théorème 1, nous obtenons les gains du contrôleur (16) suivants : $F_1 = -400.12$, $F_2 = -308.61$, $F_3 = -254.26$, $F_4 = -77.46$.

4.3 Résultats de simulation

Ce contrôleur est implémenté en simulation pour contrôler le système du convoyeur, donc pour réguler la hauteur de quinoa sortant du convoyeur (pour des raisons d'emballage). Un gain est ajouté afin d'atteindre la référence sans erreur statique. La vitesse du convoyeur est simulée via deux constantes entre les bornes du modèle TS, comme montré Fig. 2.

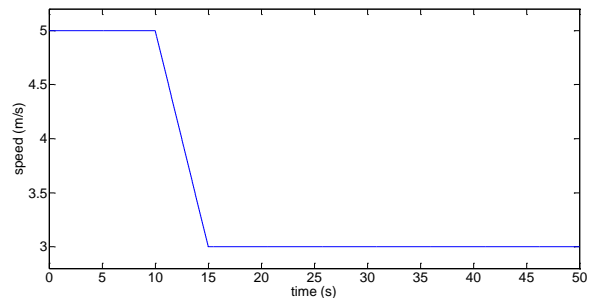


Figure 2 – Vitesse du convoyeur (m/s)

Le changement de vitesse peut représenter un changement dans le cycle de production. En diminuant la vitesse, le retard de transport augmente d'après (25) comme présenté Fig. 3.

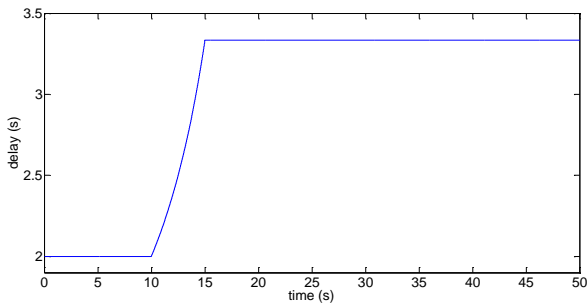


Figure 3 – Retard de transport (s)

Un changement de référence est imposé pour simuler un changement de produit. La hauteur de référence change de 1 à 2 centimètres. De plus, un bruit de capteur est ajouté à la sortie du système pour simuler des conditions réelles. Afin de comparer, un contrôleur PI est conçu avec des gains empiriques (sans prédicteur de Smith vu que le retard est variable dans le temps) Fig. 4 montre la hauteur de quinoa transporté sur le convoyeur avec les deux contrôleurs.

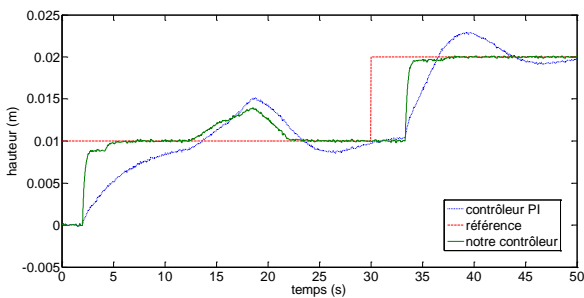


Figure 4 – Hauteur de quinoa (m)

Le contrôleur PI n'arrive pas à assurer des bonnes performances avec le retard variable. Augmenter le gain et la constante de temps du PI mène à des oscillations. Fig. 5 présente la commande générée par le contrôleur TS calculée à chaque mètre du convoyeur.

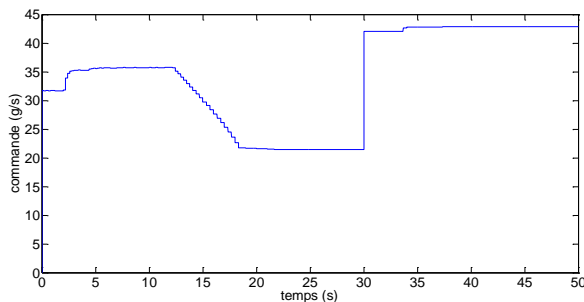


Figure 5 – Débit de quinoa entrant (g/s)

5 Conclusion

En conclusion, ce papier a présenté une manière nouvelle et originale de gérer les retards de transport variables. Il détaille la construction d'un nouveau domaine où le retard est fixe. Ce domaine implique des non-linéarités qui sont considérées avec la représentation Takagi-Sugeno. Un retour d'état flou est conçu. Le problème applicatif du convoyeur illustre que notre méthodologie fournit de bonnes performances comparées à un contrôleur PI. Les travaux futurs se concentreront sur inclure le retard dans les fonctions d'appartenance, utiliser une fonction de Lyapunov non-quadratique retardée, trouver la plus grande valeur T_s^0 pour laquelle le système reste contrôlable, et étendre les résultats aux systèmes MIMO.

Remerciements :

Recherche sponsorisée par le CISIT, la région Hauts-de-France, la Communauté Européenne, la Délégation Régionale pour la Recherche et la Technologie, le Ministère de l'Education Supérieure et de la Recherche et le CNRS. Ce travail est aussi soutenu par une bourse de l'Autorité Nationale Roumaine pour la Recherche Scientifique et l'Innovation, CNCS -- UEFISCDI, projet PN-II-RU-TE-2014-4-0942, numéro de contrat 88/01.10.2015 et le Conseil National Brésilien pour la Recherche (CNPq).

Références

- [1] E. Fridman, M. Dambrine, and N. Yeganefar, 'On input-to-state stability of systems with time-delay: A matrix inequalities approach', *Automatica*, vol. 44, no. 9, pp. 2364–2369, Sep. 2008.
- [2] E. Fridman and M. Dambrine, 'Control under quantization, saturation and delay: An LMI approach', *Automatica*, vol. 45, no. 10, pp. 2258–2264, 2009.
- [3] E. Fridman, 'Tutorial on Lyapunov-based methods for time-delay systems', *European Journal of Control*, vol. 20, no. 6, pp. 271–283, 2014.
- [4] F. O. Souza, L. A. Mozelli, and R. M. Palhares, 'On stability and stabilization of T–S fuzzy time-delayed systems', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 1450–1455, 2009.
- [5] F. O. Souza, V. C. Campos, and R. M. Palhares, 'On delay-dependent stability conditions for Takagi–Sugeno fuzzy systems', *Journal of the*

- Franklin Institute*, vol. 351, no. 7, pp. 3707–3718, 2014.
- [6] R. M. Palhares, C. E. de Souza, and P. L. D. Peres, ‘Robust Hoo filtering for uncertain discrete-time state-delayed systems’, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 8, pp. 1696–1703, 2001.
- [7] M. Dambrine and J. P. Richard, ‘Stability analysis of time-delay systems’, *Dynamic Systems and Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 405–414, 1993.
- [8] G. Zheng, F. J. Bejarano, W. Perruquetti, and J.-P. Richard, ‘Unknown input observer for linear time-delay systems’, *Automatica*, vol. 61, pp. 35–43, 2015.
- [9] M. Blandeau, T. M. Guerra, P. Pudlo, F. Gabrielli, and V. Estrada-Manzo, ‘How a person with spinal cord injury controls a sitting situation Unknown input observer and delayed feedback control with time-varying input delay’, in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Vancouver, Canada, 2016, pp. 2349–2356.
- [10] F. Zhang and M. Yeddanapudi, ‘Modeling and simulation of time-varying delays’, in *Symposium on Theory of Modeling and Simulation*, 2012, p. 34.
- [11] M. Hansen, J. Stoustrup, and J. Dimon Bendtsen, ‘Modeling and control of a single-phase marine cooling system’, *Control Engineering Practice*, vol. 21, no. 12, pp. 1726–1734, 2013.
- [12] J. Herrera, A. Ibeas, and M. de la Sen, ‘Identification and control of integrative MIMO systems using pattern search algorithms: An application to irrigation channels’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 1, pp. 334–346, 2013.
- [13] K. D. Sharma, A. Chatterjee, and A. Rakshit, ‘Harmony search algorithm and Lyapunov theory based hybrid adaptive fuzzy controller for temperature control of air heater system with transport-delay’, *Applied Soft Computing*, vol. 25, pp. 40–50, 2014.
- [14] J. Duquette, A. Rowe, and P. Wild, ‘Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow’, *Applied Energy*, vol. 178, pp. 383–393, 2016.
- [15] C. M. Cirre, M. Berenguel, L. Valenzuela, and E. F. Camacho, ‘Feedback linearization control for a distributed solar collector field’, *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 12, pp. 1533–1544, 2007.
- [16] X. Zeng and J. Wang, ‘A physics-based time-varying transport delay oxygen concentration model for dual-loop exhaust gas recirculation (EGR) engine air-paths’, *Applied Energy*, vol. 125, pp. 300–307, 2014.
- [17] K. Min, D. Jung, and M. Sunwoo, ‘Air System Modeling of Light-duty Diesel Engines with Dual-loop EGR and VGT Systems’, in *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling E-COSM*, 2015, vol. 48, pp. 38–44.
- [18] E. F. Zanoelo, A. Abitante, and L. A. C. Meleiro, ‘Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves’, *Journal of Food Engineering*, vol. 84, no. 3, pp. 458–468, 2008.
- [19] W. Chen and X. Li, ‘Model predictive control based on reduced order models applied to belt conveyor system’, *ISA Transactions*, vol. 65, pp. 350–360, 2016.
- [20] Y. Guo, S. Wang, K. Hu, and D. Li, ‘Optimization and experimental study of transport section lateral pressure of pipe belt conveyor’, *Advanced Powder Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 1318–1324, 2016.
- [21] D. He, Y. Pang, and G. Lodewijks, ‘Green operations of belt conveyors by means of speed control’, *Applied Energy*, vol. 188, pp. 330–341, 2017.
- [22] D. Ilic and C. Wheeler, ‘Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation’, *Powder Technology*, vol. 307, pp. 190–202, 2017.
- [23] S. Yurkovich and M. Simpson, ‘Comparative analysis for idle speed control: A crank-angle domain viewpoint’, in *American Control Conference (ACC)*, Albuquerque, USA, 1997, vol. 1, pp. 278–283.
- [24] T. Laurain, J. Lauber, and R. Palhares, ‘Advanced model based air path management using a discrete-angular controller in idle-speed context’, in *IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (AAC)*, Kolmarden, Sweden, 2016, vol. 49, pp. 611–618.
- [25] T. Takagi and M. Sugeno, ‘Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control’, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, no. 1, pp. 116–132, 1985.
- [26] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*. New York: Wiley, 2001.
- [27] H. O. Wang, K. Tanaka, and M. F. Griffin, ‘An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues’, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 14–23, 1996.
- [28] H. D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo, and Y. Yamamoto, ‘Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design’, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 324–332, 2001.
- [29] M. C. de Oliveira and R. E. Skelton, ‘Stability tests for constrained linear systems’, in *Perspectives in robust control*, S. O. R. M. Bs. MengSc, Ed. Springer London, 2001, pp. 241–257.