



**HAL**  
open science

# Modèles Flous de Type Takagi-Sugeno : des Origines à la Problématique Actuelle de leur Commande à Base de Signaux Echantillonnés

Kevin Guelton

► **To cite this version:**

Kevin Guelton. Modèles Flous de Type Takagi-Sugeno : des Origines à la Problématique Actuelle de leur Commande à Base de Signaux Echantillonnés. Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), 2020, Sète, France. hal-02971354

**HAL Id: hal-02971354**

**<https://hal.science/hal-02971354v1>**

Submitted on 19 Oct 2020

**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.

# Modèles Flous de Type Takagi-Sugeno : des Origines à la Problématique Actuelle de leur Commande à Base de Signaux Échantillonnés

Kevin Guelton  
CReSTIC EA3804

Université de Reims Champagne-Ardenne, Campus Moulin de la Housse BP1039, Reims Cedex 02, France  
kevin.guelton@univ-reims.fr

## Résumé :

Au cours de cette conférence invitée, nous discuterons de la commande des modèles flous de type Takagi-Sugeno (T-S). La présentation sera divisée en trois parties. La première sera consacrée à la genèse de ce type d'approches (depuis l'introduction des modèles T-S en 1985, jusqu'à la fin des années 1990). Nous aborderons ensuite une période que je considère comme étant le boom des approches T-S (depuis la fin des années 1990, jusqu'à nos jours) avec la multiplication des travaux dans ce domaine, notamment la réduction du conservatisme des conditions de synthèse. Enfin, la troisième partie sera consacrée à une problématique qui m'intéresse particulièrement aujourd'hui : la synthèse de lois de commande à base de signaux échantillonnés pour les systèmes non linéaires.

## Mots-clés :

Modèles flous de type Takagi-Sugeno, Conditions de stabilité, Synthèse de lois de commande, Données échantillonnées.

## Abstract:

During this invited talk, we will discuss the control of Takagi-Sugeno fuzzy models. The presentation will be divided into three parts. The first part will be focussed on the genesis of these control approaches (from the introduction of the T-S fuzzy models in 1985, to the end of the 90's). Then, we will come to a period that I consider to be the boom of T-S approaches (from the end of the 90's, until today) with the multiplication of works in this field, in particular dealing with the reduction of the conservatism of the design conditions. Finally, the third part will be devoted to a problem that particularly interests me today : the sampled data control of nonlinear systems.

## Keywords:

Takagi-Sugeno fuzzy models, Stability conditions, Controller design, Sampled data control.

## 1 Introduction

Depuis leur introduction en 1985, les modèles flous de type Takagi-Sugeno (T-S) [43] ont rencontré un très large succès au sein de la communauté scientifique. En effet, historiquement décrits par un formalisme à base de règles

floues, ils ont fourni un cadre prolifique pour l'étude des systèmes dynamiques non linéaires, notamment pour l'analyse de leur stabilité, pour la synthèse de lois de commande (stabilisation), d'observateurs (estimation), etc.

Avec la très large étendue de la littérature relative aux modèles T-S, il s'avère aujourd'hui difficile d'en réaliser une revue exhaustive. De ce fait, j'ai choisi de diviser cette présentation en trois parties qui correspondent, selon mon propre prisme, à trois phases chronologiques de l'évolution du champ d'étude des modèles T-S en automatique : La genèse (de 1985 à la fin des années 90), le boom (à partir de la fin des années 90 et jusqu'à ce jour) avec notamment de nombreux travaux relatifs à la réduction du conservatisme des conditions de stabilité ou de synthèse, et enfin une problématique actuelle qui m'intéresse particulièrement : la synthèse de lois de commande à base de signaux échantillonnés pour les systèmes non linéaires.

## 2 La genèse (de 1985 à la fin 90)

Sous sa forme originelle, un modèle T-S [43] est constitué de l'inférence d'un ensemble de  $r$  règles floues réalisant un partitionnement de l'espace d'état (prémises) d'un système dynamique non linéaire, et dont les conséquences (sommets) décrivent une collection de modèles dynamiques linéaires (dynamiques locales). Celles-ci sont illustrées par la  $i^{\text{ème}}$  règle floue suivante ( $i = 1, \dots, r$ ) :

Si  $z_1(t)$  est  $M_1^i$  et ... et  $z_p(t)$  est  $M_p^i$ ,

Alors 
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \end{cases} \quad (1)$$

qui, après défuzzification barycentrique, permettent l'expression d'un modèle T-S sous la forme compacte (défuzzifiée) donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(C_i x(t) + D_i u(t)) \end{cases} \quad (2)$$

où  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  représente le vecteur d'état,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  le vecteur d'entrées,  $y(t) \in \mathbb{R}^q$  le vecteur de sorties;  $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$  et  $D_i \in \mathbb{R}^{q \times m}$  sont des matrices constantes décrivant les dynamiques locales;  $h_i(z(t)) \geq 0$  sont les fonctions d'appartenances vérifiant les propriétés de sommes convexes  $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$  et  $z(t) \in \mathbb{R}^p$  le vecteur de prémisses (dépendant uniquement de l'état pour la commande).

Il en résulte qu'un modèle T-S est une représentation polytopique convexe d'un système non linéaire, i.e. une collection de modèles linéaires pondérés par des fonctions d'appartenances captant les non-linéarités du système. De ce fait, par le biais des outils de l'optimisation convexe, il devient possible d'étendre certains concepts de l'analyse des systèmes linéaires au cas des systèmes non linéaires. C'est ainsi que, sur la base d'une fonction candidate de Lyapunov quadratique donnée par :

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t) \quad (3)$$

où  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est une matrice symétrique définie positive, les premières conditions de stabilité en boucle ouverte (i.e. pour  $u(t) = 0$ ) ont été proposées par Tanaka et Sugeno (1992) pour les modèles T-S (2) sous forme d'Inégalités Linéaires Matricielles (LMI). Celles-ci sont résumées par le lemme suivant.

**Lemme 1.** [44] *Le modèle T-S (2) en boucle ouverte ( $u(t) = 0$ ) est globalement asymptotiquement stable s'il existe une matrice  $P = P^T > 0$  vérifiant les LMIs suivantes :*

$$A_i^T P + P A_i < 0, \forall i \in \{1, \dots, r\} \quad (4)$$

Ensuite, dans le but de stabiliser les modèles T-S (2), le concept de Compensation Parallèle Distribuée (PDC) a été proposé [50]. Celui-ci consiste à appliquer une loi de commande partageant la même structure floue que le modèle T-S considéré, donnée par :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \quad (5)$$

où  $F_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$  sont les matrices de gains à synthétiser. Ainsi, par substitution de (5) dans (2), on obtient l'expression de la dynamique en boucle fermée :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (A_i + B_i F_j) x(t) \quad (6)$$

La synthèse de la loi de commande PDC (5), garantissant la stabilité de la dynamique en boucle fermée (6), peut dans ce cas être réalisée à l'aide des conditions LMIs présentées dans le lemme suivant. Elles sont obtenues à l'aide de la fonction candidate de Lyapunov quadratique  $V(x(t)) = x^T(t) P^{-1} x(t)$ .

**Lemme 2.** [50] *Le modèle T-S (2) est globalement asymptotiquement stabilisé par la loi de commande (5), s'il existe les matrices  $N_j$  et  $P = P^T > 0$  telle que :*

$$\Gamma_{ij} + \Gamma_{ji} < 0, \forall (i, j) \in \{1, \dots, r\}^2 / i \leq j \quad (7)$$

avec  $\Gamma_{ij} = P A_i^T + A_i P + B_i N_j + N_j^T B_i^T$ .

Dans ce cas, les gains de la loi de commande sont donnés par  $F_i = N_i P^{-1}$ .

Si les conditions présentées ci-dessus ont constitué le fondement de la très grande majorité des travaux actuels sur la commande des modèles T-S, il convient toutefois de préciser

qu'ils n'étaient alors pas unanimement admis par la communauté automatique. En effet, les détracteurs des modèles T-S voyaient en leur connotation "floue" un caractère approximatif. Ils arguaient alors que les contrôleurs PDC ainsi synthétisés ne pouvaient garantir la stabilité en boucle fermée du système non linéaire considéré. Aussi, malgré la démonstration de la propriété d'approximateurs universels des modèles T-S [5], il eu fallu attendre la fin des années 1990 pour lever ce voile avec l'introduction des approches de décomposition en Secteurs Non Linéaires [45, 48]. Celles-ci permettent l'obtention d'un modèle T-S représentant exactement un modèle non linéaire sur un compact de son espace d'état. Qui plus est, il est aujourd'hui communément admis que les modèles T-S équivalent strictement les modèles quasi-LPV (quasi Linéaire à Paramètres Variants) introduits par Shamma en 1993 [39]. Dans ce contexte et suite à ces travaux fondateurs, le caractère formel des approches d'analyse et de synthèse à base de modèles T-S ayant été établi, ils feront, dès la fin des années 90, l'objet de très nombreux travaux pour l'extension à de plus larges classes de systèmes non linéaires, ainsi que pour une grande variété de problèmes en automatique.

### 3 Le boom (à partir de la fin des années 90)

Comme le montre la Fig. 1, avec l'évolution du nombre de citations de l'article séminal [43], de très nombreuses études se réfèrent à lui. Ainsi, depuis la fin des années 1990 et jusqu'à ce jour, une grande multitude de travaux ont été réalisés pour étendre les approches d'analyse et de synthèse à base de modèles T-S présentées à la section précédente. Parmi ceux-ci, on trouve pour exemples et de manière qui ne peut être exhaustive :

- La synthèse d'observateurs [27]. Celle-ci se faisant tout d'abord en considérant les variables de prémisses entièrement mesurables [24,45], puis dans le cas plus réaliste

où ces dernières sont non mesurées (voir par exemple [7, 19]).

- Des extensions à la classe des systèmes non linéaires sous la forme de descripteurs [2, 11, 47], notamment très adéquate pour l'étude des systèmes mécaniques à matrices d'inerties variables [14, 40].
- La synthèse de lois de commande par retour de sorties [6, 8, 15, 33, 35, 53], nécessaire dans la pratique lorsque les variables d'état ne sont pas directement accessibles pour la partie commande.
- Le diagnostic et la commande tolérante aux fautes [4, 9, 20], essentiels pour la fiabilisation des systèmes.
- Des extensions à la classe des systèmes non linéaires à commutations [1, 10, 22].
- La commande des systèmes non linéaires à retards [3, 13, 29, 41].
- Etc.

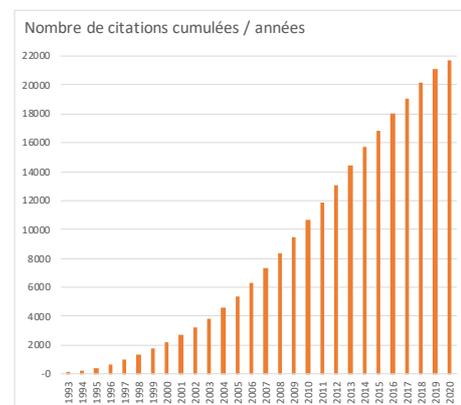


Figure 1 – Évolution annuelle du nombre de citations cumulées de l'article séminal de Takagi et Sugeno [43], selon Google Scholar.

Néanmoins, si les sujets abordés sont extrêmement variés, une grande majorité des travaux réalisés pour l'analyse et la synthèse à base de modèles T-S poursuivent un but commun : la réduction du conservatisme [26, 38]. En effet, les conditions LMI d'analyse de stabilité et de synthèse (voir par exemple les Lemmes 1 et 2) ne sont que suffisantes,

et donc induisent un certain degré de pessimisme vis-à-vis de l'ensemble des solutions admissibles. Parmi les pistes de réductions du conservatisme, plusieurs approches ont portées leurs fruits.

Tout d'abord, l'obtention des conditions LMI de stabilité ou de stabilisation sont, la plupart du temps, extraites à partir d'inégalités paramétrées impliquant une structure floue en double somme du type :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))\Gamma_{ij} < 0 \quad (8)$$

Dans contexte, et parmi les nombreuses propositions, le lemme suivant est très souvent considéré car il constitue un bon compromis entre complexité et coût de calcul [38].

**Lemme 3.** [49] : *L'inégalité (8) est satisfaite si les conditions suivantes sont vérifiées :*

$$\frac{2}{r-1}\Gamma_{ii}+\Gamma_{ij}+\Gamma_{ji} < 0, \forall (i, j) \in \{1, \dots, r\}^2 \quad (9)$$

Une autre piste de relaxation des conditions LMI, qui a elle aussi fait l'objet de nombreuses études, repose sur le choix des fonctions candidates de Lyapunov. En effet, les fonctions quadratiques (3) impliquent la recherche d'une matrice commune  $P = P^T > 0$  à un ensemble de contraintes LMI, ce qui constitue une importante source conservatisme. Afin de palier ce problème, des fonctions candidates de Lyapunov non-quadratiques ont été introduites sous la forme [23] :

$$V(x(t)) = x^T(t) \sum_{i=1}^r h_i(z(t))P_i x(t) \quad (10)$$

Si celles-ci ne posent pas de problème dans le cas des modèles T-S décrits en temps discret [17], elles comportent néanmoins un inconvénient lorsque ceux-ci sont décrits en temps continu. En effet, les conditions de stabilité font, dans ce dernier cas, intervenir les dérivées des fonctions d'appartenances qu'il

convient de majorer afin d'obtenir des conditions LMI (e.g.  $|\dot{h}_i(z(t))| \leq \phi_i$ ) [46]. Dans ce contexte, les conditions LMI ne peuvent plus garantir une stabilité globale. De ce fait, des conditions locales permettant la synthèse de contrôleurs non-PDC, simultanément à l'estimation du domaine d'attraction, ont été proposées dans [18].

Par ailleurs, afin de proposer des conditions non-quadratiques globales, d'autres fonctions candidates de Lyapunov ont été proposées. Notamment les fonctions de Lyapunov sous forme d'intégrales curvilignes [37] qui conduisent à des conditions LMI en stabilité, mais qui présentent l'inconvénient de ne fournir des conditions LMI en stabilisation uniquement pour les modèles T-S d'ordre inférieur ou égal à 2 [16]. Plus récemment, une autre approche considérant des fonctions de Lyapunov non-quadratiques impliquant la valeur moyenne des fonctions d'appartenances sur une fenêtre temporelle glissante a été proposée [34]. Si cette approche reste malgré tout conservative, elle présente l'avantage de permettre l'extension à l'analyse des systèmes non linéaires à commutations [10].

Enfin, une dernière piste importante pour la réduction du conservatisme des conditions LMI consiste en l'introduction de matrices de relaxation (voir par exemple [3, 10, 21, 34]). Celle-ci peut être effectuée au travers de l'application de transformations matricielles, par exemple les transformations de Peaucelle [36] ou encore le Lemme de Finsler [42].

## 4 Synthèse de lois de commande à base de signaux échantillonnés pour les systèmes T-S

Dans cette partie, j'ai choisi de faire un focus sur une problématique qui m'intéresse tout particulièrement aujourd'hui : la synthèse de lois de commande discrétisées (échantillonnées) pour la stabilisation des modèles T-S décrits en temps continu. En effet, si une majo-

rité des processus à contrôler sont décrits par des modèles non linéaires en temps continu (équations de la physique), leur commande est quasiment toujours réalisée par des contrôleurs digitaux (évoluant en temps discrétisé). C'est le cas par exemple des systèmes mécatroniques dont la partie commande est souvent embarquées, parfois sur des contrôleurs "low cost" ne possédant pas une grande puissance de calculs (Arduino, Raspberry pi,...).

Dans la pratique, de tels contrôleurs sont souvent synthétisés à partir d'une discrétisation du modèle du processus à piloter, e.g. [8, 9, 11, 17, 28, 30, 41]. Néanmoins, ces approches nécessitent de faibles fréquences d'échantillonnage au regard de la dynamique du système continu à stabiliser, ce qui n'est pas toujours possible avec des contrôleurs de faible coûts. En effet, avec de larges périodes d'échantillonnage, la stabilité en boucle fermée du système continu ne peut être garantie par ces méthodes entre deux instants d'échantillonnage [25]. Une manière élégante de palier ce problème a été introduite par Fridman, Seuret et Richard pour les systèmes linéaires [12]. Celle-ci consiste à réécrire la boucle fermée (système continu + contrôleur digital) sous la forme d'un système continu à retard variable sur l'entrée. Afin d'introduire cette approche, notons que les signaux de commande échantillonnés sont maintenus, pour la partie continue, par un bloqueur d'ordre zéro entre deux instants d'échantillonnage  $t_k$  et  $t_{k+1}$ . Ainsi,  $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$  ( $k \in \mathbb{N}$ ), tout signal échantillonné  $s$  peut être réécrit sous la forme  $s(t - \tau(t))$ , où  $\tau(t) = t - t_k$  est une fonction continue par morceau (dents de scie) avec  $\dot{\tau}(t) = 1, \forall t \neq t_{k+1}^-$ . Ce principe, appliqué à la stabilisation des modèles T-S (2), permet de proposer une loi de commande PDC à base de données échantillonnées sous la forme :

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t_k)) F_i x(t_k) \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t - \tau(t))) F_i x(t - \tau(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

qui, par substitution dans (2), permet d'exprimer la dynamique en boucle fermée par un modèle T-S à retard variable sur l'entrée :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i x(t) \\ &+ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t - \tau(t))) B_i F_j x(t - \tau(t)) \end{aligned} \quad (12)$$

Notons toutefois que la dynamique en boucle fermée (12) fait maintenant intervenir une structure en double somme impliquant les fonctions d'appartenance  $h_i(z(t))$  et  $h_j(z(t - \tau(t)))$  qui sont asynchrone. Dans ce cas, il n'est plus possible d'appliquer directement les approches de relaxation telles que le Lemme 3, impliquant par conséquent un degrés de conservatisme élevé pour les conditions de synthèse. Ainsi, basé sur l'emploi d'une fonction candidate de Lyapunov-krasovskii, des conditions LMI pour la synthèse de loi de commande à base de données échantillonnées pour la stabilisation des modèles T-S ont été proposées dans [52], avec toutefois un conservatisme élevé. Afin de réduire ce dernier, des approches ont également été proposées afin de majorer le décalage  $|h_i(z(t)) - h_j(z(t - \tau(t)))| \leq \delta \leq 1$  (voir par exemple [51]). Néanmoins, celles-ci nécessitent la connaissance a priori du paramètre  $\delta$ , ce qui n'est pas aisé dans la pratique.

Afin de contourner ces problèmes, nous avons très récemment proposé, dans le cadre des travaux de thèse d'Adriano N. D. Lopes, une extension du Lemme 3 pour réduire le conservatisme des conditions de synthèse de lois de commande des modèles T-S à base de signaux échantillonnés [31]. Cette nouvelle approche faisant intervenir les bornes des dérivées des fonctions d'appartenance, des résultats plus complets, prenant également en compte des saturations sur l'entrée et l'estimation du domaine d'attraction en boucle fermée, sont détaillées dans [32]. L'efficacité de ces résultats sera illustrée au cours de la présentation au travers d'un exemple de simulation sur la stabilisation

à base de données échantillonnées d'un simple pendule inversé sur un chariot.

#### Remerciements :

Je tiens à remercier chaleureusement Grégory Smits (Président du comité de programme), Anne Laurent et Olivier Strauss (Présidents du comité d'organisation), pour l'honneur qu'ils m'ont fait en m'invitant pour ces 29èmes Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA2020).

#### Références

- [1] A. Bezaouia, A. El Hajjaji, F. Tadeo. Stabilization of switching Takagi–Sugeno systems by switched Lyapunov function. *ISA transactions*, 25(12) : 1039-1049, 2010.
- [2] T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni. Robust fuzzy Lyapunov stabilization for uncertain and disturbed Takagi–Sugeno descriptors. *ISA transactions*, 49(4) : 447-461, 2010.
- [3] F Bourahala, K Guelton, N Manamanni, F Khabber. Relaxed Controller Design Conditions for Takagi–Sugeno Systems with State Time-Varying Delays. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(5) : 1406–1416, 2017.
- [4] K Bouibed, L Seddiki, K Guelton, H Akdag. Actuator and sensor fault detection and isolation of an actuated seat via nonlinear multi-observers. *Systems Science & Control Engineering*, 2(1) : 150-160, 2014.
- [5] J.L. Castro, M. Delgado. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics*, 26(1) : 149-152, 1996.
- [6] M. Chadli, D. Maquin, J. Ragot. Static output feedback for Takagi-Sugeno systems : an LMI approach. *10th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2002*, pp. 1.6.
- [7] M. Chadli, H.R. Karimi. Robust observer design for unknown inputs Takagi–Sugeno models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1) : 158-164, 2012.
- [8] M Chadli, TM Guerra. LMI solution for robust static output feedback control of discrete Takagi–Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(6), 1160-1165 : 2012.
- [9] M. Chadli, A. Abdo, S.X. Ding. H-/H $\infty$  fault detection filter design for discrete-time Takagi–Sugeno fuzzy system. *Automatica*, 49(7) : 1996-2005, 2013
- [10] A. Cherifi, K. Guelton, L. Arcese, V.J.S. Leite. Global non-quadratic D-stabilization of Takagi–Sugeno systems with piecewise continuous membership functions. *Applied Mathematics and Computation*, 351 : 23-36, 2019.
- [11] V. Estrada-Manzo, Z. Lendek, T.M. Guerra. Controller design for discrete-time descriptor models : a systematic LMI approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(5) : 1608 - 1621, 2015.
- [12] E. Fridman, A. Seuret, J.-P. Richard. Robust sampled-data stabilization of linear systems : An input delay approach. *Automatica*, 40 : 1441–1446, 2004.
- [13] H. Gassara, A. El Hajjaji, M. Chaabane. Robust control of T-S fuzzy systems with time-varying delay using new approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 20(14) : 1566–1578, 2010.
- [14] K. Guelton, S. Delprat, T.M. Guerra. An alternative to inverse dynamics joint torques estimation in human stance based on a Takagi–Sugeno unknown-inputs observer in the descriptor form. *Control Engineering Practice*, 16(12) : 1414-1426, 2008.
- [15] K. Guelton, T. Bouarar, N. Manamanni. Robust dynamic output feedback fuzzy Lyapunov stabilization of Takagi–Sugeno systems—A descriptor redundancy approach. *Fuzzy sets and systems*, 160(19) : 2796-2811, 2009.
- [16] K. Guelton, T.M. Guerra, M. Bernal, T. Bouarar, N. Manamanni. Comments on fuzzy control systems design via fuzzy Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 40(3) : 970-972, 2010.
- [17] T.M. Guerra, L. Vermeiren. LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi–Sugeno's form. *Automatica*, 40(5) : 823-829, 2004.
- [18] T.M. Guerra, M. Bernal, K. Guelton, S. Labiod. Non-quadratic local stabilization for continuous-time Takagi-Sugeno models. *Fuzzy Sets and Systems*, 201 : 40-54, 2012.
- [19] D. Ichalal, B. Marx, J. Ragot, D. Maquin. State estimation of Takagi-Sugeno systems with unmeasurable premise variables. *IET Control Theory & Applications*, 4(5) :897-908, 2010.
- [20] D. Ichalal, B. Marx, J. Ragot, D. Maquin. Fault detection, isolation and estimation for Takagi-Sugeno nonlinear systems. *Journal of the Franklin Institute* 351(7) : 3651-3676, 2014.
- [21] A. Jaadari, T.M. Guerra, A. Sala, M. Bernal, K. Guelton. New controllers and new designs for continuous-time Takagi-Sugeno models. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2012*, pp. 1-7.
- [22] D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, A. Jaadari, C.D. Chinh. Robust stabilization of nonlinear systems based on a switched fuzzy control law. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 14(2) : 40-49, 2012.
- [23] A. Jadbabaie. A reduction in conservatism in stability and L2 gain analysis of Takagi-Sugeno fuzzy systems via linear matrix inequalities. *IFAC Proceedings Volumes*, 32(2) : 5451-5455, 1999.
- [24] D. Khlar, J. Lauber, T. Floquet, T.M. Guerra. An observer design for the instantaneous torque estimation of an IC engine. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2005*, pp. 1-6.
- [25] L. Hetel, C. Prieur, H. Omran, A. Seuret, E. Fridman, J.P. Richard, S.I? Niculescu. Recent developments on the stability of systems with aperiodic sampling : An overview. *Automatica*, 76 : 309-335, 2017.
- [26] H.K. Lam. A review on stability analysis of continuous-time fuzzy-model-based control systems : From membership-function-independent to

- membership-function-dependent analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67 : 390-408, 2018.
- [27] Z. Lendek, T.M. Guerra, R. Babuska, B. De Schutter. *Stability Analysis and Nonlinear Observer Design Using Takagi-Sugeno Fuzzy Models*. Springer-Verlag, 2010.
- [28] Z. Lendek, Z. Nagy, J. Lauber. Local stabilization of discrete-time TS descriptor systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67 : 409-418, 2018.
- [29] L. Li, X. Liu. New results on delay-dependent robust stability criteria of uncertain fuzzy systems with state and input delays. *Information Sciences* 179(8) : 1134–1148, 2009.
- [30] A.N.D. Lopes, V.J.S. Leite, L.F.P. Silva, K. Guelton. Anti-windup TS Fuzzy PI-like Control for Discrete-Time Nonlinear Systems with Saturated Actuators. *International Journal of Fuzzy Systems*, 22(1) : 46-61, 2020.
- [31] A.N.D. Lopes, K. Guelton, L. Arcese, V.J.S. Leite, F. Bourahala. Finsler-based Sampled-data Controller Design for Takagi-Sugeno Systems. *IFAC World Congress, 2020*, pp. 1-6.
- [32] A.N.D. Lopes, K. Guelton, L. Arcese, V.J.S. Leite. Local Sampled-data Controller Design for TS Fuzzy Systems with Saturated Actuators. *IEEE Control Systems Letters*, 5(4) : 1169-1174, 2021.
- [33] B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, A. Kruszewski, T.M. Guerra. Output feedback LMI tracking control conditions with  $H_\infty$  criterion for uncertain and disturbed T–S models. *Information Sciences*, 179(4) : 446-457, 2009.
- [34] R. Marquez, T.M. Guerra, M. Bernal, A. Kruszewski. A non-quadratic Lyapunov functional for  $H_\infty$  control of nonlinear systems via Takagi–Sugeno models. *Journal of the Franklin Institute*, 353(4) : 781-796, 2016.
- [35] A.T. Nguyen, C. Sentouh, H. Zhang, J.C. Popieul. Fuzzy Static Output Feedback Control for Path Following of Autonomous Vehicles with Transient Performance Improvements. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 21(7) : 3069-3079, 2020.
- [36] D. Peaucelle, D. Arzelier, O. Bachelier, J. Bernussou. A new robust D-stability condition for real convex polytopic uncertainty. *Systems & Control Letters*, 40(1) : 21-30, 2000.
- [37] B.J. Rhee, S. Won. A new fuzzy Lyapunov function approach for a Takagi–Sugeno fuzzy control system design. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(8) : 1211-1228, 2006.
- [38] A. Sala. On the conservativeness of fuzzy and fuzzy-polynomial control of nonlinear systems. *Annual Reviews in Control*, 33(1) : 48-58, 2009.
- [39] J.S. Shamma, J.R. Cloutier. Gain-scheduled missile autopilot design using linear parameter varying transformations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16(2) : 256–263, 1993.
- [40] H. Schulte, K. Guelton. Modelling and simulation of two-link robot manipulators based on Takagi Sugeno fuzzy descriptor systems. *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006*, pp. 2692-2697.
- [41] L.F.P. Silva, V.J.S. Leite, E.B. Castelan, M. Klug, K. Guelton. Local stabilization of nonlinear discrete-time systems with time-varying delay in the states and saturating actuators. *Information Sciences*, 518 : 272-285, 2020.
- [42] R.E. Skelton, T. Iwasaki, K.M. Grigoriadis. *A Unified Algebraic Approach to Linear Control Design*. Taylor and Francis, 1998.
- [43] T. Takagi, M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15(1) : 116-132, 1985.
- [44] K. Tanaka, M. Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy sets and systems*, 45(2) : 135-156, 1992.
- [45] K. Tanaka, T. Ikeda, H.O. Wang. Fuzzy regulators and fuzzy observers : relaxed stability conditions and LMI-based designs. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(2) : 250-265, 1998.
- [46] K. Tanaka, T. Hori, H.O. Wang. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 11(4) : 582-589, 2003.
- [47] T. Taniguchi, K. Tanaka, H.O. Wang. Fuzzy descriptor systems and nonlinear model following control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(4) : 442 - 452, 2000.
- [48] T. Taniguchi, K. Tanaka, H. Ohtake, H.O. Wang. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(4) : 525–538, 2001.
- [49] H. D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo, Y. Yamamoto. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(2) : 324-332, 2001.
- [50] H.O. Wang, K. Tanaka, M.F. Griffin. An approach to fuzzy control of nonlinear systems : stability and design issues. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(1) : 14-23, 1996.
- [51] Y. Wang, H.R. Karimi, H.K. Lam, H. Shen. An improved result on exponential stabilization of sampled-data fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(6) : 3875-3883, 2018.
- [52] J. Yoneyama. Robust  $H_\infty$  control of uncertain fuzzy systems under time-varying sampling. *Fuzzy Sets and Systems*, 161 : 859–871, 2010.
- [53] M. Zerar, K. Guelton, N. Manamanni. Linear fractional transformation based H-infinity output stabilization for Takagi-Sugeno fuzzy models. *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, 4(3) : 111-121, 2008.