

## Commande tolérante aux défauts du robot manipulateur basé sur flou type 2 adaptatif backstepping en présence de la variation de la charge utile

Hilal Rahali<sup>1\*</sup> Samir Zeglache<sup>2</sup> Loutfi Benyettou<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Laboratoire de génie électrique, Département de Génie Electrique, Université Mohamed Boudiaf M'sila, BP 166, Ichbilia 28000, Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire d'analyse des signaux et systèmes, Département de Génie Electrique, Université Mohamed Boudiaf M'sila, BP 166, Ichbilia 28000, Algérie

\* Auteur correspondant Email: hilal.rahali@univ-msila.dz

---

**Abstract:** Dans cette étude, un contrôleur flou type 2 adaptatif backstepping (AFT2BC) a été proposé pour un robot manipulateur industriel PUMA560 avec une charge variable et en présence de défauts d'actionneur. Le procédé réalise un suivi précis de la trajectoire aux effecteurs terminaux du manipulateur et améliore sa robustesse vis-à-vis de l'incertitude du modèle (variation de charge utile) et des défauts d'actionneur lors du contrôle de la position du robot. En utilisant les avantages de la commande de backstepping, la vitesse de convergence de l'algorithme de commande a été améliorée et son erreur en régime permanent a été réduite. De plus, l'intégration de la loi d'approximation continue a été utilisée pour éliminer les broutages en temps réel pendant le processus de contrôle sans affecter la robustesse du système. Une loi de commande adaptative floue type 2 a été conçue afin de garantir la compensation des défauts et des incertitudes, une petite erreur de suivi et une réponse transitoire rapide où la connaissance préalable des incertitudes et des perturbations externes n'est pas nécessaire, sans faire disparaître la propriété de précision et de robustesse de suivi. Enfin, l'analyse de stabilité a été effectuée en utilisant la méthode de Lyapunov et des simulations comparatives en fonctionnement défectueux sont menées pour montrer la supériorité de la stratégie de contrôle développée.

**Keywords:** Contrôle tolérant aux défauts, adaptatif flou type 2, backstepping, robot PUMA560, variation de charge utile.

---

### 1. Introduction

Ces dernières années, le robot manipulateur devient très important dans plusieurs applications industrielles telles que la peinture, le perçage et le soudage. Il a acquis une grande préoccupation en raison de la grande performance dans ces tâches nécessitant une haute précision pour le suivi de trajectoire.

Le contrôle des robots manipulateurs est très difficile car ce type de système est caractérisé par des non-linéarités élevées, effets de couplage et les incertitudes et perturbations externes [1]. Des efforts ont été faits pour résoudre ces problèmes, comme la commande PID, la commande par logique floue [3], la commande du réseau de neurone [4], la commande de linéarisation par rétroaction [5], la

commande prédictif [6], la commande en mode glissant [8-10] et la commande backstepping [11] qui a été adaptée pour garantir la poursuite des robots manipulateurs. Le contrôle du mode glissant est une méthode de contrôle robuste non linéaire efficace car il fournit à la dynamique du système un comportement de robustesse aux perturbations et incertitudes externes dès que la dynamique du système est entraînée dans la surface de glissement [12, 13].

Dans [14], une commande de mode de glissement robuste basée sur une surface de glissement PID linéaire a été développée pour le manipulateur de robot, cette stratégie de commande peut gérer des incertitudes de paramètres limités et des perturbations externes. Un contrôleur de mode glissant de premier ordre pour un manipulateur de

robot à deux liaisons a été conçu dans [15]. Le contrôle terminal mode de glissant en utilisant des surfaces de glissement non linéaires a été proposé dans [16] de manière à atteindre une convergence en temps fini sans fournir une entrée de commande élevée. Dans [17, 18] a proposé une commande terminal rapide mode de glissement non singulier pour des robots manipulateurs afin de minimiser la vitesse de convergence. Néanmoins, la commande de mode glissant contient une expression de commutation qui conduit au phénomène de broutage, qui produira probablement une fréquence élevée dans les signaux de commande, destruction de l'actionneur et une grande consommation d'énergie.

Récemment, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature afin de réduire les phénomènes de bavardage comme dans [19] les auteurs ont utilisé la méthode de la couche limite, où la fonction de signe remplacée par une fonction sigmoïde ou une fonction saturation. Mais cette solution dégrade la robustesse et les performances. C'est pourquoi d'autres techniques efficaces ont été proposé par exemple dans [20, 21], où les auteurs ont adopté un contrôle de mode glissant d'ordre élevé en introduisant des algorithmes de torsion et de super-torsion. Une autre solution basée sur le mode glissant du second ordre a été proposée dans [22, 23]. L'approche de backstepping fournit un instrument méthodique de construction en boucle fermée de la fonction de Lyapunov à une large classe de systèmes non linéaires. En raison de sa configuration facile, cette méthode de contrôle est largement utilisée dans les systèmes du robot manipulation, comme dans [24] un contrôle de backstepping robuste a été appliqué au robot spatial planaire flottant à deux bras. Les résultats prouvent l'efficacité de la stratégie de contrôle développée.

Un contrôle hybride non linéaire utilisant des méthodes adaptatives qui est une technique de contrôle efficace pour les systèmes dynamiques tels que les robots manipulateurs ... Dans [25], il introduit un robuste contrôle terminal rapide de mode glissant non singulier avec adaptation des paramètres afin de stabiliser la position et la vitesse du robot manipulateur 2-DOF vers zéro en temps fini. Une approche adaptative du terminal mode de glissement de second ordre a été développée dans [26] pour obtenir un meilleur suivi de la trajectoire souhaitée avec l'élimination du phénomène de broutage. Une autre stratégie de contrôle adaptative proposée dans [27] basée sur le mode de glissement terminal non singulier rapide du second ordre où toutes les incertitudes existant dans le robot manipulateur 2-DOF sont dominées en adoptant

l'approche adaptative. De plus, une connaissance préalable de la limite supérieure des incertitudes n'est pas nécessaire. Dans [28], une technique de contrôle adaptatif de backstepping est introduite pour que le robot manipulateur suivi de trajectoire en présence de perturbations et d'incertitudes externes. Un contrôle flou adaptatif mode glissant a été proposé dans [29] pour robots manipulateurs planaire 3 DOF, où les auteurs ont utilisé un système de logique floue de type 1 pour produire le contrôle discontinu. De plus, le gain de sortie est adapté en ligne par un système d'inférence floue de supervision afin d'éviter les effets de bavardage. La stabilité en boucle fermée est prouvée en utilisant le théorème de Lyapunov. Dans [30], les auteurs suggèrent que la méthode de contrôle flou adaptatif backstepping pour les manipulateurs de robots à trois liens pour obtenir les erreurs de suivi tend à zéro en temps fini. Un contrôleur flou adaptatif a été conçu pour le robot manipulateur dans [31], ce schéma de contrôle peut compenser les erreurs de modélisation et les perturbations externes, les résultats de la simulation illustrent une robustesse puissante et une meilleure précision. La majorité des travaux de recherche précédents supposent que les systèmes des robots manipulateurs sont en bon état. Par conséquent, la motivation de cet article est de fournir un contrôle robuste tolérant aux défauts basé sur l'approche de backstepping et le flou type 2 adaptatif pour le problème de suivi de chemin du manipulateur robotique 3-DOF avec une charge utile variable.

Une méthode adaptative de contrôle backstepping flou type 2 est étudiée dans cet article, qui convient aux systèmes non linéaires avec des incertitudes (variation de charge utile) et des défauts d'actionneur [32-35].

L'avantage de la méthode de contrôle proposée est de compenser toutes les incertitudes en même temps et éviter le problème de «l'explosion de complexité». En introduisant des paramètres de contrôle réglables spéciaux, pour que le contrôle du système est grandement améliorée, et l'entrée de contrôle initiale est considérablement réduite [32].

Les principales contributions de la méthode de contrôle proposée sont mises en évidence comme suit:

- Par rapport au contrôle passif tolérant aux défauts conçu dans [36, 37] qui demande de connaître ou d'identifier les défauts, ce schéma de contrôle devient très difficile en cas de défauts complexes. Dans cet article, le contrôleur proposé a besoin d'un système adaptatif flou de type 2 afin d'obtenir une estimation robuste des incertitudes et des défauts.

- Le contrôle adaptatif tolérant aux défauts proposé contient un terme robuste à gain adaptatif permet d'avoir plus de robustesse face aux incertitudes et aux défauts qui donnent certaines supériorités par rapport à [29, 31], qui sont basés sur le contrôle flou adaptatif traditionnel du robot manipulateur.
- Dans [38, 39], les auteurs adoptent un contrôleur tolérant aux défauts compliqué basé sur un observateur pour estimer les défauts. Malheureusement, cette méthode nécessite un observateur supplémentaire qui augmentera le temps de calcul, ce qui n'est pas souhaité pour une implémentation en temps réel. Dans ce travail, un schéma de contrôle adaptatif tolérant aux défauts ne nécessite pas un observateur ou un bloc de diagnostic.
- Une nouvelle commande de terminal rapide PID-non singulier mode de glissement a été utilisée dans [40], afin de donner une commande robuste et tolérante aux défauts des robots manipulateurs. De plus, l'estimation du retard de temps est introduite pour approcher le modèle dynamique inconnu, malgré les bons résultats obtenus, cette approche est très compliquée par rapport au travail proposé, où le modèle dynamique inconnu est estimé directement par le système adaptatif flou de type 2 sans nécessitant une estimation du temps de retard.
- Contrairement à [30], l'approche de contrôle adaptatif introduite dans ce travail a été réalisée à toutes les étapes de l'algorithme de backstepping de synthèse traitant d'un robot manipulateur 3-DOF en fonctionnement défectueux. D'autre part dans [30], une condition saine de robot manipulateur 3-DOF est prise en compte. D'autre part dans [30], une condition saine de robot manipulateur 3-DOF est prise en compte.
- Le contrôleur logique flou a été largement utilisé pour contrôler les robots manipulateurs dans divers articles tels que [41-44]. Néanmoins, les essais et les erreurs conduisent à la limitation considérable de ces techniques [45]. Dans [46], un contrôleur PID flou type 2 optimisé est conçu pour contrôler un robot manipulateur avec une charge utile variable pour atteindre le suivi de chemin et pour minimiser les effets des perturbations externes, mais il ne peut pas gérer les défauts. D'autre part, dans ce travail, une commande adaptative floue type 2 est développée afin d'obtenir un meilleur suivi de chemin avec une charge utile variable et défauts d'actionneur.

- La commande adaptative concerne l'ajustement en ligne des régulateurs de la boucle de régulation afin de garantir un certain niveau de performance. Plusieurs travaux récents ont utilisé cette approche pour contrôler les robots manipulateurs [19, 25, 28, 47, 48], cette technique s'est avérée rapide et non affectée aux perturbations externes, où aucun modèle exact n'est requis. Cependant, les effets des défauts ne sont pas pris en compte. Dans cet article, le contrôle hybride basé sur le backstepping et le système flou type 2 est développé comme un contrôle tolérant aux défauts avec l'existence de perturbations externes, de défauts d'actionneur et d'incertitudes.

Afin de prouver l'efficacité de l'approche proposée (AFT2BC), des simulations sont effectuées dans l'environnement de programmation MATLAB sur le modèle dynamique de robot manipulateur 3-DOF. La méthode de contrôle proposée nous permet d'éviter les problèmes de modélisation, de fournir de faibles erreurs de suivi et de meilleure robustesse face aux variations de charge utile et aux effets de défauts d'actionneur. Les contributions de cet article peuvent être résumées comme suit:

- La méthode de contrôle non linéaire adaptatif présentée dans cet article concerne les robots manipulateurs 3-DOF afin de fournir un suivi robuste à l'existence d'incertitudes telles que les variations de charge utile et les défauts d'actionneur en même temps, de plus, le contrôle proposé ne nécessite pas la connaissance du modèle dynamique.
- La commande proposée est introduite dans le modèle non linéaire parfait du robot manipulateur de 3-DOF avec des effets de couplage dans lesquels l'étape de découplage n'a pas besoin dans la conception de la commande.

Le reste de cet article est organisé comme suit, dans la section 2, le modèle dynamique du robot dans l'état sain et défectueux est présenté. La section 3 présente le contrôle robuste tolérance aux défauts utilisant une commande floue type 2 adaptative backstepping. Les résultats des simulations et la discussion sont donnés dans la section 4. La section 5 présente une comparaison quantitative. Les conclusions sont résumées dans la section 6.

## **2. Modèle dynamique du robot manipulateur**

### **2.1 Modèle dynamique du robot manipulateur en bon état**

Le robot PUMA 560 est un bras de robot à trois DOF, ce type de robot est largement utilisé dans l'industrie. La figure 1 illustre la configuration des robots PUMA 560.

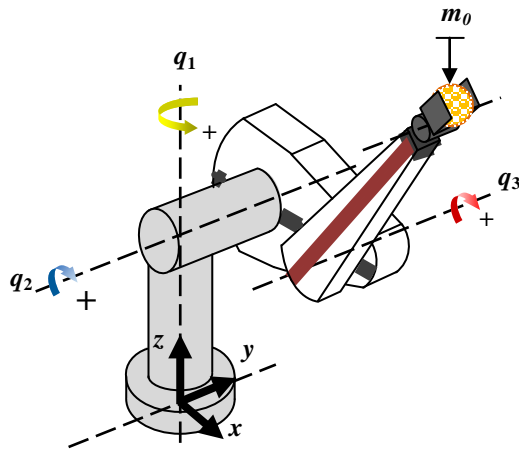


Figure.1 Configuration du robot PUMA 560 [49].

Le modèle dynamique du PUMA 560 est donné par [45]:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + u_{m_0} = u \quad (1)$$

où  $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$  est le vecteur de couple d'entrée de l'articulation,  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  est le vecteur de position de l'articulation,  $\dot{q} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]^T$  est le vecteur de vitesse articulaire,  $\ddot{q} = [\ddot{q}_1 \ \ddot{q}_2 \ \ddot{q}_3]^T$ ,  $M(q)$  est une matrice symétrique définie positive d'accélération inertielle,  $V_m(q, \dot{q})$  est la matrice de la coriolis et des forces centrifuges,  $G(q)$  est un vecteur variable d'état des termes de gravité.  $M(q)$ ,  $V_m(q, \dot{q})$  et  $G(q)$  sont donnés à l'annexe A, et  $u_{m_0}$  est le vecteur du couple dû à la charge utile  $m_0$  déterminé par [49]:

$$u_{m_0} = m_0 J^T(q) [J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} + g] \quad (2)$$

Avec:  $g = [0 \ 0 \ 9.81]^T$  et  $J$  est la matrice jacobienne déterminée à l'annexe A.

Eq. (1) réorganisé par:

$$\ddot{q} = [M(q) + m_0 J^T(q)J(q)]^{-1} [u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - m_0 J^T(q)\dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} - m_0 J^T(q)g] \quad (3)$$

## 2.2 Modèle dynamique du robot manipulateur en état défectueux

Dans les robots manipulateurs, la défaillance des actionneurs peut être engendrée par plusieurs causes telles que la défaillance des systèmes d'alimentation. Le modèle dynamique du robot manipulateur en fonctionnement défectueux est obtenu par:

$$\ddot{q} = [M(q) + m_0 J^T(q)J(q)]^{-1} [u_f - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - m_0 J^T(q)\dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} - m_0 J^T(q)g] \quad (4)$$

Avec:

$$u_f = u + U_0 \quad (5)$$

$U_0$  est une fonction inconnue liée aux défauts de l'actionneur.

Remplaçant Eq. (5) dans Eq. (4), le modèle dynamique d'Eq. (3) devient:

$$\ddot{q} = [M(q) + m_0 J^T(q)J(q)]^{-1} [u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - m_0 J^T(q)\dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} - m_0 J^T(q)g] + \vartheta(q, \dot{q}, u) \quad (6)$$

$$\text{Avec: } \vartheta(q, \dot{q}, u) = [M(q) + m_0 J^T(q)J(q)]^{-1} U_0$$

## 3. Conception d'une commande robuste tolérante aux défauts

Le modèle dynamique d'équation (6) dans l'espace d'états peut être réécrit comme:

Si  $M(q)$ ,  $V_m(q, \dot{q})$  et  $G(q)$  sont connus et sans incertitudes de charge utile ni défauts d'actionneur, c.à.d.  $U_0$  la présentation de l'espace d'états du robot PUMA 560 est obtenue comme suit

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = [M(q)]^{-1} [u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)] \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

Où  $x_1 = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  est le vecteur d'état,  $x_2 = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]^T$

La variable d'erreur de suivi est définie par:

$$e_1 = q_d - x_1 \quad (8)$$

Où  $q_d = [q_{1d} \ q_{2d} \ q_{3d}]^T$  est le signal souhaité.

### Etape 1

La fonction Lyapunov est définie comme suit:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (9)$$

La dérivée temporelle d'Eq. (11) est calculé par:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{q}_d - \dot{x}_2) \quad (10)$$

La loi de commande virtuelle  $\beta_2$  est obtenue par:

$$\beta_2 = \dot{q}_d + c_1 e_1 \quad (11)$$

Où  $c_1 \in \mathfrak{R}^3$  est un vecteur constant positif.

### Etape 2

Dans cette étape, la variable d'erreur de suivi est donnée comme suit:

$$e_2 = \beta_2 - x_2 = \dot{q}_d + c_1 e_1 - x_2 \quad (12)$$

Les dérivées temporelles de  $e_1, e_2$  sont calculées par:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = \ddot{q}_d + c_1 (e_2 - c_1 e_1) - [M(q)]^{-1} [u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)] \end{cases} \quad (13)$$

La fonction de Lyapunov augmentée définit par:

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} [M(q)] e_2^2 \quad (14)$$

La dérivée temporelle d'Eq. (14) est donné comme:

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + [M(q)] e_2 \dot{e}_2 - \frac{1}{2} [\dot{M}(q)]^{-1} [M(q)]^2 e_2^2 \quad (15)$$

Remplaçant Eq. (13) dans l'Eq. (15) donne:

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_1^2 + e_2 \left( \frac{\ddot{q}_d + c_1 (e_2 - c_1 e_1) - [M(q)]^{-1} [u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)]}{[M(q)]^{-1}} - \frac{1}{2} [\dot{M}(q)]^{-1} [M(q)]^2 e_2 - u \right) \quad (16)$$

La loi de commande  $u$  est obtenue par:

$$u = \frac{1}{[M(q)]^{-1}} \left( \ddot{q}_d + c_1 (e_2 - c_1 e_1) + [M(q)]^{-1} [V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)] - \frac{1}{2} [\dot{M}(q)]^{-1} [M(q)] e_2 \right) + c_2 e_2 \quad (17)$$

Où  $c_2 \in \mathfrak{R}^3$  est un vecteur constant positif.

Utiliser Eq. (17), on peut dire que:

$$\dot{V}_2 \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 \quad (18)$$

$$\dot{V}_2 < 0 \quad (19)$$

Les fonctions  $M(q), V_m(q, \dot{q})$  et  $G(q)$  sont inconnus et  $\vartheta(q, \dot{q}, u)$  terme qui inclut les variations de charge utile, et les effets des défauts de l'actionneur sont différents de zéro ( $U_0 \neq 0$  et  $m_0 \neq 0$ ), dans cet article, un système adaptatif flou de type 2 a été utilisé pour traiter ce problème. L'approche proposée concerne l'estimation en ligne de la loi de commande idéale obtenue par méthode de backstepping utilisant un système d'inférence floue de type 2 où les paramètres flous sont ajustés par des lois adaptatives.

La loi de contrôle idéale présentée dans l'Eq. (17) peuvent être réécrits sous la forme suivante [50]:

$$u = u_b + c_2 e_2 \quad (20)$$

Avec:

$$u_b = \frac{1}{[M(q)]^{-1}} \left( \ddot{q}_d + c_1 (e_2 - c_1 e_1) + [M(q)]^{-1} [V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)] - \frac{1}{2} [\dot{M}(q)]^{-1} [M(q)] e_2 \right) \quad (21)$$

Le système d'inférence floue de type 2 est principalement utilisé pour estimer les lois de commande  $u_{b,j}$  dans l'Eq. (21) par:

$$\hat{u}_b = W^T (e_1, \dot{e}_1) \Theta \quad (22)$$

Où  $\Theta$  désigne les paramètres vectoriels adaptés, et  $W^T(X)$  représente les fonctions de base moyennes obtenues par un système flou type 2 où chaque fonction de base est donnée par la moyenne des fonctions de base gauche et droite correspondantes. Le  $u_b$  réel peut être exprimé sous la forme suivante:

$$u_b = W^T (e_1, \dot{e}_1) \Theta^* + \varepsilon \quad (23)$$

Où  $\Theta^*$  sont les paramètres optimaux, et  $\varepsilon$  sont les erreurs d'estimation satisfont la condition:  $|\varepsilon| \leq \bar{\varepsilon}$

Où  $\bar{\varepsilon}$  est un paramètre positif inconnu.

Les lois de contrôle adaptatif appliquées au robot sont données par [50]:

$$u = u_a + u_r + u_p \quad (24)$$

Avec:

1.  $u_a$  est l'expression de la commande adaptative floue type 2 qui est conçue pour estimer la loi de

commande idéale de recul  $u_b$  en Eq. (21) donné comme:

$$u_a = \hat{u}_b = W^T(e_1, \dot{e}_1)\Theta \quad (25)$$

Où  $W^T(X)$  désigne les fonctions de base moyennes obtenues par un système flou type 2 où chaque fonction de base est donnée par la moyenne des fonctions de base gauche et droite correspondantes et  $\Theta$  sont les paramètres vectoriels adaptés donnés par:

$$\dot{\Theta} = \gamma e_2 W(e_1, \dot{e}_1) - \sigma_1 \Theta \quad (26)$$

Où  $\gamma > 0$  and  $\sigma_1 > 0$ ,  $e_2 = \dot{q}_d + c_1 e_1 - x_2$  and  $\Theta(0) = 0$ .

2.  $u_r$  est les termes de la commande robustes qui sont ajoutés pour réduire à la fois les effets de l'erreur d'estimation floue de type 2 et les incertitudes déterminées par

$$u_r = \hat{\varepsilon} \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}} = \eta \hat{e}_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) - \sigma_2 \hat{\varepsilon} \quad (28)$$

Avec  $\eta > 0$ ,  $\sigma_2 > 0$ ,  $\chi > 0$  and  $\hat{\varepsilon}(0) = 0$ .

3.  $u_p$  sont données par:

$$u_p = c_2 e_2 \quad (29)$$

Où  $c_2 > 0$ .

### 3.1 Analyse de stabilité

Définissons la fonction Lyapunov suivante:

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} [M(q)] e_2^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} + \frac{1}{2\eta} \tilde{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon} \quad (30)$$

$\tilde{\varepsilon}$  et  $\tilde{\Theta}$  sont les erreurs d'estimation sont définies par:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon^* - \hat{\varepsilon} \quad (31)$$

$\hat{\varepsilon}$  est l'estimation de  $\varepsilon^*$

$$\tilde{\Theta} = \Theta^* - \Theta \quad (32)$$

La dérivée temporelle d'Eq. (30) donne:

$$\dot{V} = -c_1 e_1^2 + e_2 (u_b - u) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\tilde{\Theta}} + \frac{1}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \dot{\tilde{\varepsilon}} \quad (33)$$

Remplaçant Eq. (23), Eq. (24), Eq. (25) et Eq. (29) dans l'Eq. (33) donne:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 + e_2 (W^T(e_1, \dot{e}_1)\Theta^* + \varepsilon - W^T(e_1, \dot{e}_1)\Theta - u_r - c_2 e_2) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\tilde{\Theta}} + \frac{1}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \dot{\tilde{\varepsilon}} \quad (34)$$

Les vecteurs de paramètres optimaux  $\Theta^*$  et  $\varepsilon_j^*$  varient lentement dans le temps, donc la dérivée temporelle de l'erreur d'estimation sera:

$$\dot{\tilde{\varepsilon}} = -\dot{\hat{\varepsilon}} \text{ et } \dot{\tilde{\Theta}} = -\dot{\Theta} \quad (35)$$

Remplaçant Eq. (34) dans Eq. (35) et en tenant compte de l'Eq. (32) On obtient::

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_2 W^T(e_1, \dot{e}_1)\tilde{\Theta} + e_2 (\varepsilon - u_r) - \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\tilde{\Theta}} - \frac{1}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \dot{\tilde{\varepsilon}} \quad (36)$$

En introduisant l'Eq. (26) et Eq. (28) dans l'Eq. (36), donne:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_2 (\varepsilon - u_r) + \frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta - \frac{1}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \eta e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} \quad (37)$$

Remplaçant l'Eq. (31) dans Eq. (37) on obtient:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_2 (\varepsilon - u_r) + \frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta - \varepsilon^* e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \hat{\varepsilon} e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} \quad (38)$$

Ou équivalent:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta - \varepsilon^* e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \hat{\varepsilon} e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} - e_2 u_r + |e_2| \varepsilon^* \quad (39)$$

En introduisant l'Eq. (27) dans l'Eq. (39), donne:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta + |e_2| \varepsilon^* - \varepsilon^* e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) + \frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon} \hat{\varepsilon} \quad (40)$$

Considérons l'inégalité écrite comme suit pour toute valeur de  $\zeta > 0$  [51]:

$$|e_2| - e_2 \tanh\left(\frac{e_2}{\chi}\right) \leq \zeta \chi = \varsigma \quad (41)$$

Avec  $\zeta$  est un constant égale  $\zeta = 0.2785$ . Donc l'Eq. (41) est modifié comme suit:

$$\dot{V} \leq -c_1 \hat{e}_1^2 - c_2 \hat{e}_2^2 + \varepsilon^* \varsigma + \frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta + \frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon} \hat{\varepsilon} \quad (42)$$

En utilisant les inégalités, Nous obtenons:

$$\frac{\sigma_1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta \leq -\frac{\sigma_1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta + \frac{\sigma_1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^{*T} \Theta^* \quad (43)$$

$$\frac{\sigma_2}{\eta} \tilde{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} \leq -\frac{\sigma_2}{2\eta} \tilde{\varepsilon}^2 + \frac{\sigma_2}{2\eta} |\varepsilon^*|^2 \quad (44)$$

En introduisant l'Eq. (43) et l'Eq. (44) dans l'Eq. (42), on a:

$$\dot{V} \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \varepsilon^* \varsigma - \frac{\sigma_1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^T \Theta + \frac{\sigma_1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^{*T} \Theta^* - \frac{\sigma_2}{2\eta} \tilde{\varepsilon}^2 + \frac{\sigma_2}{2\eta} |\varepsilon^*|^2 \quad (45)$$

On spécifie:

$$c = \min\{\sigma_1, \sigma_2, 2c_1, 2c_2\} \quad (46)$$

Eq. (45) devient:

$$\dot{V} \leq -cV + \rho \quad (47)$$

Avec:

$$\rho = \varepsilon^* \varsigma + \frac{\sigma_1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^{*T} \Theta^* + \frac{\sigma_2}{2\eta} |\varepsilon^*|^2 \quad (48)$$

En intégrant l'Eq. (48), donne:

$$V(t) \leq V(0) e^{-ct} + \frac{\rho}{c} \quad (49)$$

À partir de l'Eq. (47) on a prouvé que la loi de commande proposée du robot PUMA 560 présentée dans l'Eq. (24) est asymptotiquement stable malgré les incertitudes de la charge utile de présence et les défauts de l'actionneur par conséquent les erreurs de suivi convergent vers zéro, ce qui en donne une démonstration complète. Le schéma de contrôle proposé est présenté à la figure 2.

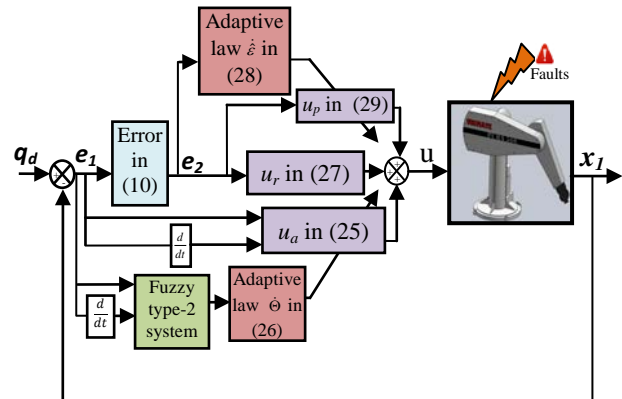


Figure. 2 Schéma de contrôle adaptatif proposé.

## 4. Résultats de la simulation

La méthode de la commande développée a été réalisée par simulation utilisant l'environnement MATLAB/Simulink afin de vérifier l'efficacité et la capacité atteintes pour les performances de suivi des trois articulations. Les paramètres physiques du robot PUMA 560 sont donnés en annexe A.

Deux tests de simulation du robot PUMA 560 sont effectués, où les incertitudes de charge utile et les défauts d'actionneur sont pris en compte. Dans le test 1, les trois articulations du robot PUMA 560 reçoivent l'ordre de suivre une trajectoire de référence sinusoïdale. Dans le test 2, une trajectoire cycloïdale de référence est considérée vers les trois articulations du robot PUMA 560, en plus ces deux tests contiennent une étude comparative avec les méthodes des contrôles précédentes proposées dans la littérature. Pour chaque test de simulation, la variable d'entrée ( $e_{1,2m+1}, \dot{e}_{1,2m+1}$ ) du système flou type 2 dans l'Eq. (25) sont décomposées en cinq variables linguistiques sur les intervalles normalisés  $[-1, 1]$  avec cinq fonctions d'appartenance gaussiennes flou type 2.

### 4.1. Test 1:

Dans cette première simulation, le robot est supposé suivre la trajectoire souhaitée suivante:

$$\begin{cases} q_{1d} = \cos\left(\frac{8}{5\pi}t\right) - 1 \\ q_{2d} = \cos\left(\frac{8}{5\pi}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ q_{3d} = \sin\left(\frac{8}{5\pi}t + \frac{\pi}{2}\right) - 1 \end{cases} \quad (50)$$

Pour vérifier l'efficacité de la commande tolérante aux défauts proposée, nous fournissons un défaut rapide  $U_0 = [350 \ 360 \ 320]^T N.m$  at  $t=12 \text{ sec}$  dans les trois actionneurs en même temps. De plus, la masse de la charge utile  $m_0$  appliquée à l'extrémité du troisième joint varie de 10 kg to 2 kg au cours de la période de 25 sec, comme le montre la figure 3. Les déplacements angulaires initial son  $q((0) = [17.2 \ 14.3 \ 17.2]^T \text{ deg}$  . Les simulations sont effectuées pour prouver la compétence de l'approche de contrôle proposée en condition défectueuse et comparées à d'autres stratégies de contrôle dans la littérature comme [19, 25 and 27]. Les résultats de la simulation numérique sont illustrés dans les figures 3-6. Les positions des articulations 1, 2 et 3 sont présentées sur la figure 4. Les signaux d'erreur de suivi sont illustrés sur la figure 5. Il est à noter qu'un bon suivi de trajectoire est donné lorsqu'en utilisant la stratégie de contrôle proposée. Pour mieux prouver les performances supérieures en condition défectueuse de la stratégie de contrôle proposée, trois contrôleurs proposés dans [19, 25 et 27] sont considérés dans notre simulation pour le but de la comparaison. Les réelles trajectoires le long des articulations 1, 2 et 3 positions, correspondant aux méthodes des contrôles proposées en [19, 25 et 27] s'écartent de leurs valeurs souhaitées comme la montre a la figure 4, ce qui explique l'insuffisance de cette stratégie de contrôle en condition défectueuse. Le contrôleur proposé a moins d'erreurs de suivi par rapport aux trois autres contrôleurs comme présentés sur la figure 5. La figure 6 présente les entrées de commande, qui peuvent clairement voir que les couples de commande sont lisses.

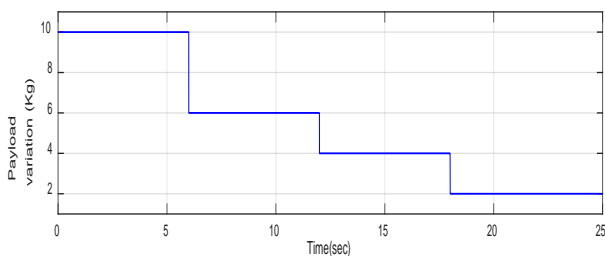


Figure. 3 Variation de la charge utile (Test 1).

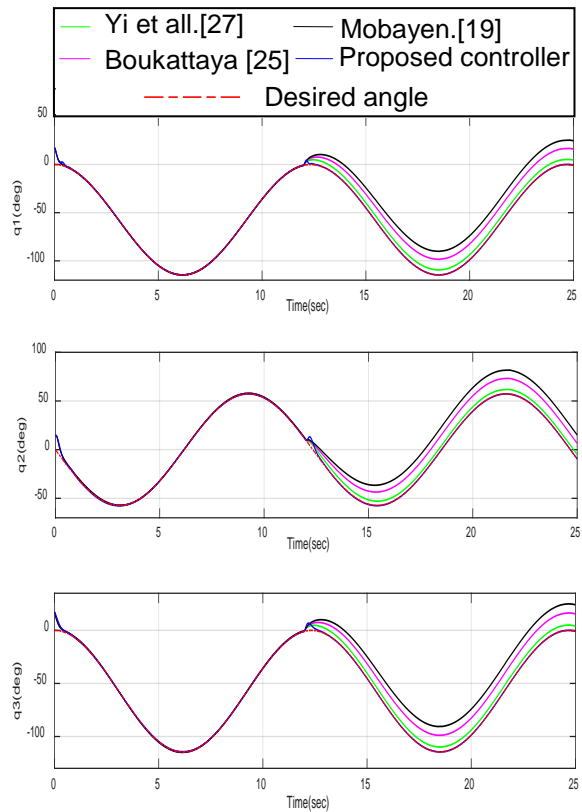


Figure. 4 Suivi des angles articulaires (Test 1).

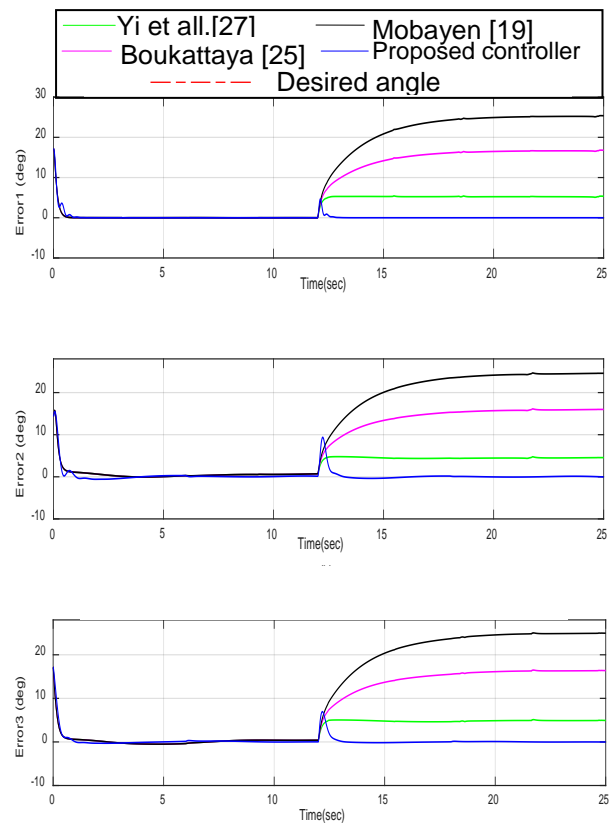


Figure .5 Erreurs de suivi des angles de joint (Test 1).

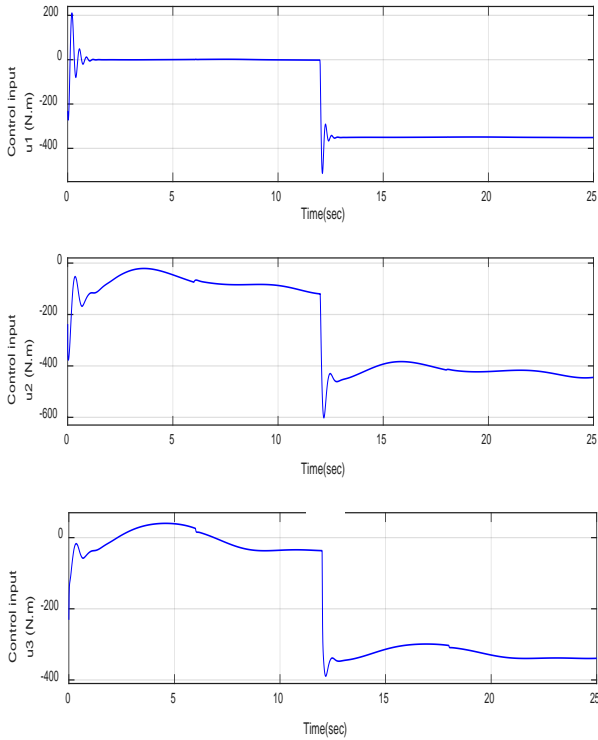


Figure. 6 Contrôle du signal d'entrée de la commande proposé (Test 1).

#### 4.2. Test 2:

Dans ce test, les signaux de fonction cycloïdale sont utilisés comme performance de référence. Les trois trajectoires souhaitées des articulations sont choisies comme suit:

$$q_{di}(t) = \begin{cases} q_{di}(0) + \frac{D_i}{2\pi} \left[ 2\pi \frac{t}{t_f} - \sin\left(2\pi \frac{t}{t_f}\right) \right] & \text{for } 0 \leq t \leq t_f \\ q_{di}(t_f) & \text{for } t > t_f \text{ with } i = \{1, 2, 3\} \end{cases} \quad (51)$$

Où:  $D_i = q_{di}(t_f) - q_{di}(0)$  et  $t_f$  est le moment final du mouvement du robot.

Afin de vérifier la capacité de la commande proposée contre les défauts de l'actionneur, nous fournissons le défaut brusque suivant:

$$U_0 = \begin{cases} 150 \text{ N.m} & t = 2 \text{ sec} \\ 120 \text{ N.m} & t = 2 \text{ sec} \\ 230 \text{ N.m} & t = 3 \text{ sec} \end{cases} \quad (52)$$

La masse de la charge utile varie dans l'intervalle de 10 kg to 2 kg et elle est représentée sur la figure 7. Les conditions initiales des trois joints sont  $q((0) = [-54 \ -130 \ 125]^T \text{ deg}$ . Les performances de suivi de trajectoire des trois articulations sont présentées sur la figure 8 et la figure 9 indique l'erreur de suivi d'articulation pour les articulations 1, 2 et 3, respectivement. Il est à noter que l'erreur de suivi en état défectueuse de la commande proposée est la plus petite par rapport aux commandes proposées dans [19, 25 et 27]. Les positions de l'articulation 1, 2 et 3 obtenues par les stratégies de commandes proposées en [19, 25 et 27] sont déviées de leurs trajectoires de références comme le montre la figure 8, ce qui indique l'incapacité de cette méthode de commande en fonctionnement défectueux.

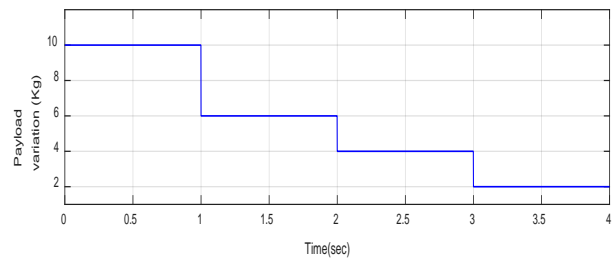


Figure. 7 Variations de la charge utile (Test 2).

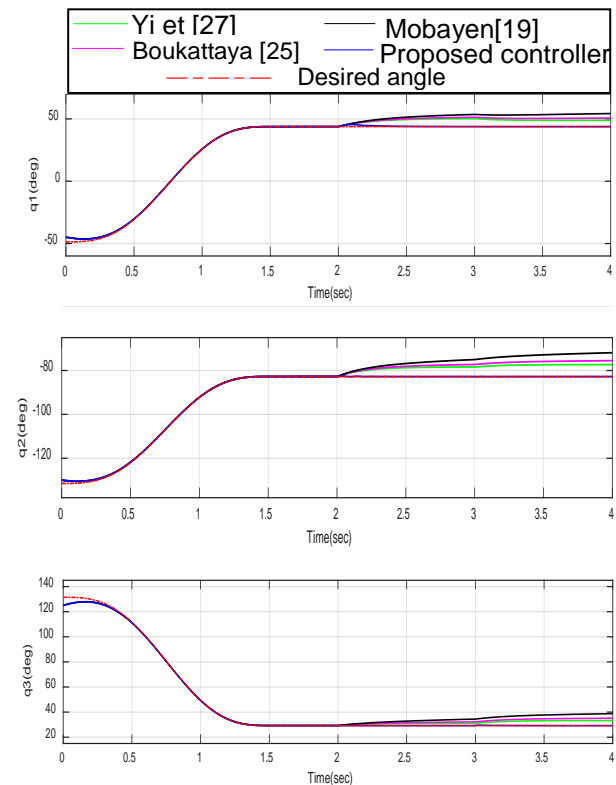


Figure.8 suivi des angles articulaires (Test 2).

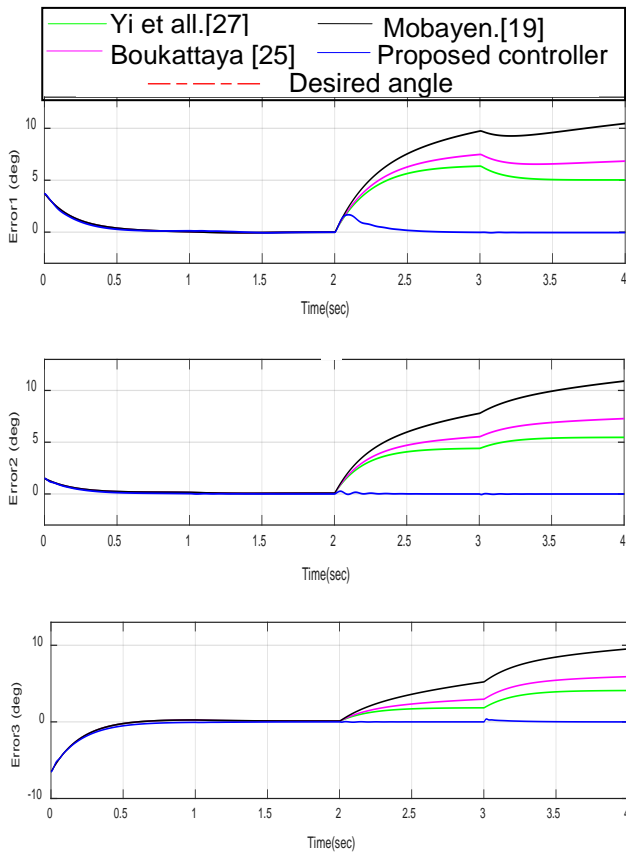


Figure. 9 Erreurs de suivi des angles de joint (Test 2).

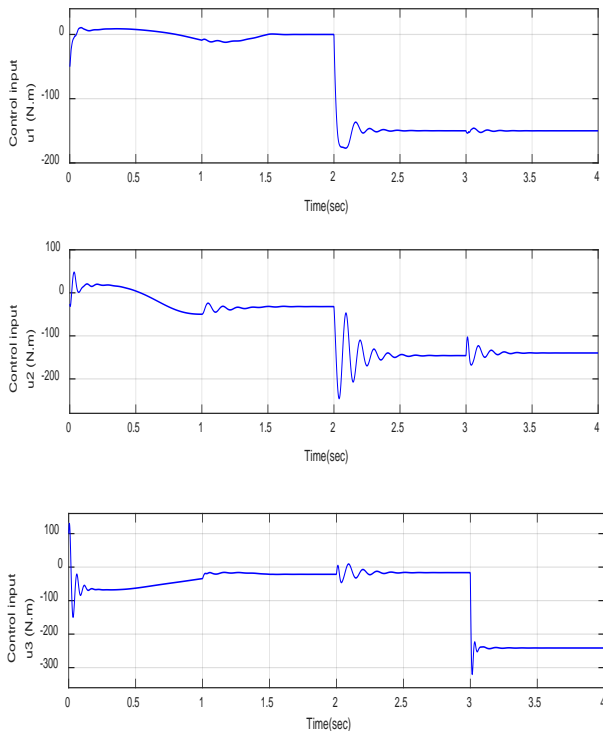


Figure.10 Contrôle du signal d'entrée de la commande proposé (Test 2).

## 5. Comparaison des performances de la commande proposée avec des autres utilisant flou type 2 adaptatif backstepping (AFT2BC)

Dans cette section, une comparaison quantitative sera abordée afin de bien illustrer la comparaison entre quatre stratégies de contrôle basées sur le flou type 2 adaptatif backstepping, à cet effet un IAE (erreur absolue intégrale), ISE (erreur quadratique intégrale), IATE (intégrale d'erreur absolue en temps) et ISV. Les IAE, ISE et IATE sont utilisées comme suivi des erreurs mesurées et ISV indique la consommation d'énergie. Les critères IAE, ISE, IATE et ISV sont définis comme suites:

$$IAE = \int_0^{t_f} |e_1(t)| dt \quad (53)$$

$$ISE = \int_0^{t_f} e_1^2(t) dt \quad (54)$$

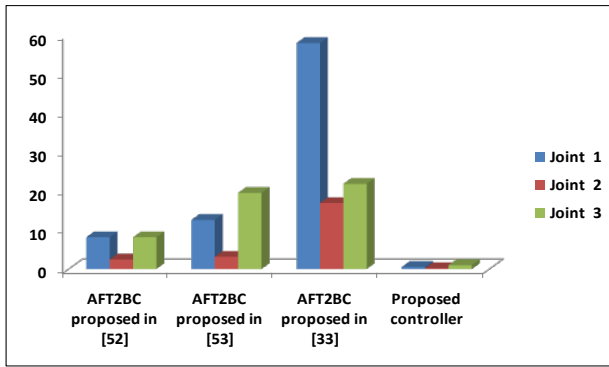
$$IATE = \int_0^{t_f} t |e_1(t)| dt \quad (55)$$

$$ISV = \int_0^{t_f} u_1^2(t) dt \quad (56)$$

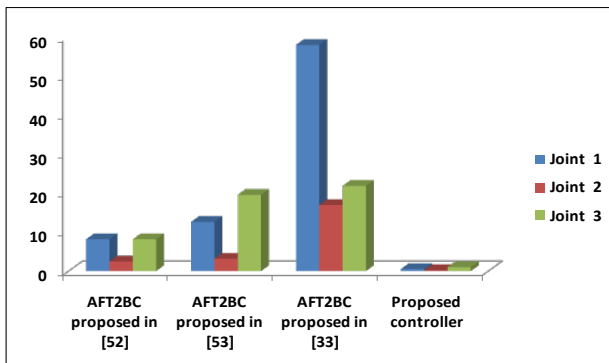
D'après les résultats de comparaison quantitative présentés dans le tableau 1 et la figure 11. Il est confirmé que les valeurs des indices de performance (IAE, ISE et IATE) de la stratégie AFT2BC proposée sont inférieures à celles existants dans [33,52, 53]. De plus, en comparant les entrées de commande (consommation d'énergie), on remarque que la stratégie de commande proposée donne également des performances d'entrée de commande supérieures, comme indiqué dans le tableau 1 et la figure 11.

Table 1. Comparaison quantitative sous perturbations externes, variation de charge utile et défauts d'actionneur avec la commande flou type 2 adaptatif backstepping.

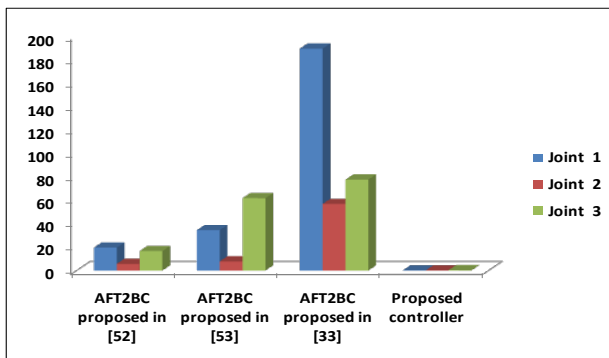
Schéma de contrôle		AFT2BC proposée en [52]	AFT2BC proposée en [53]	AFT2BC proposée en [33]	Stratégie proposée AFT2BC
		<b>IAE</b>	Joint 1	19.53	12.61
	Joint 2	2.45	3.14	16.94	<b>0.2155</b>
	Joint 3	8.15	19.55	21.85	<b>1.016</b>
<b>ISE</b>	Joint 1	23.14	65.93	2.07	<b>0.9763</b>
	Joint 2	2.27	3.83	210.51	<b>0.1484</b>
	Joint 3	30.95	318.87	558.25	<b>3.233</b>
<b>IATE</b>	Joint 1	19.53	34.41	189.31	<b>0.122</b>
	Joint 2	5.61	7.76	56.78	<b>0.08</b>
	Joint 3	19.53	34.41	189.31	<b>0.122</b>
<b>ISV</b>	Joint 1	5.61	7.76	56.78	<b>0.08</b>
	Joint 2	19.53	34.41	189.31	<b>0.122</b>
	Joint 3	5.61	7.76	56.78	<b>0.08</b>



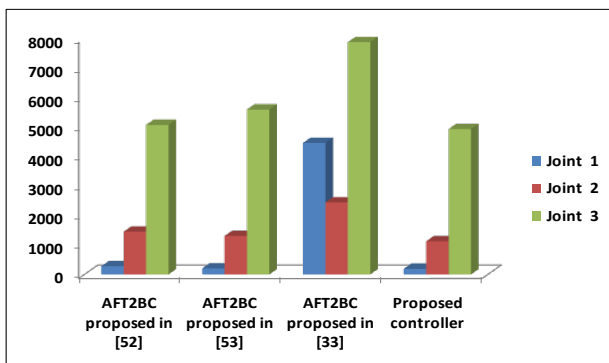
IAE



IAE



IATE



ISV

Figure. 11 Histogramme des indices de performance (IAE, ISE, IATE et ISV).

## 6. Conclusion

Dans ce travail, un contrôle robuste adaptatif flou type 2 a été développé pour le suivi de trajectoire d'un robot manipulateur industriel 3-DOF en état défectueux. L'adaptation consiste à des ajustements en ligne de paramètres flous type 2 en exploitant les concepts de stabilité de Lyapunov.

De plus, la stratégie de la commande proposée contient un terme de additif à gain adaptatif afin de compenser les erreurs d'estimation et les défauts des actionneurs. Les résultats de la simulation de la stratégie de commande proposée démontrent l'efficacité à donner une petite erreur de suivi dans la variation de la charge utile et les défauts d'actionneur. On peut également conclure que la stratégie de la commande proposée garantit les meilleures performances en fonctionnement défectueux par rapport aux stratégies de commandes proposées dans [19, 25 et 27]. De plus, l'algorithme de la commande développée ne nécessite pas de connaissances a priori sur le modèle dynamique. Par conséquent, la commande proposée peut fonctionner dans des conditions défectueuses telles que les incertitudes du modèle et les perturbations externes.

Les résultats des simulations numériques montrent qu'une précision de suivi satisfaisante est obtenue en utilisant le flou type 2 adaptatif backstepping proposé. Enfin, les travaux futurs seront axés sur la mise en œuvre pratique du contrôle proposé.

## References

- [1] L.M. Capisani, A. Ferrara, L. Magnani, "Second order sliding mode motion control of rigid robot manipulators", In: *Proc. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, USA, pp. 12-14, 2007.
- [2] P. Rocco, "Stability of PID control for industrial robot arms", *IEEE Trans Robot Autom*, Vol.12, No.4, pp. 606-614, 1996.
- [3] E. Kim, "Output feedback tracking control of robot manipulators with model uncertainty via adaptive fuzzy logic", *IEEE Trans Fuzzy Sys*, Vol.12, No.3, pp. 368-378, 2004.
- [4] W. He, Y. Dong, "Adaptive fuzzy neural network control for a constrained robot using impedance learning", *IEEE Trans Neural Netw Learn*, Vol.29, No.4, pp. 1174-1186, 2018.
- [5] K. Kreutz, "On manipulator control by exact linearization", *IEEE Trans Automat Control*, Vol.34, No.7, pp. 763-770, 1989.
- [6] P. Poignet, M. Gautier, "Nonlinear model predictive control of a robot manipulator", In:

*Proc. of the 6th international workshop on advanced motion control*, pp. 401-406, 2000.

- [7] F. Lin, R. D. Brandt, "An optimal control approach to robust control of robot manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.14, No.1, pp. 69-77 1998.
- [8] J.J. Slotine, S.S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators", *International journal of control*, Vol. 38 No.2, pp. 465-492, 1983.
- [9] SI. Han, J. Lee "Finite-time sliding surface constrained control for a robot manipulator with an unknown dead zone and disturbance". *ISA Trans*, Vol.65, pp. 307-318, 2016.
- [10] L. Zhao, H. Cheng, T. Wang, "Sliding mode control for a two-joint coupling nonlinear system based on extended state observer", *ISA Trans*, Vol. 73, pp.130-140, 2018.
- [11] H. Benadda, B. Bourahla and A. Mansouri. Robust observer based backstepping controller for robot manipulator. In: *Proc. of the 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, Algiers, Algeria, pp. 91-96, 2016.
- [12] M. Zhu, Y. Li, "Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators", *International journal of Nonlinear Control*, Vol. 20, No. 4, pp. 472-488, 2010.
- [13] Q.P. Ha, D.C. Rye, H.F. Durrant-Whyte, "Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators", *Automatica*, Vol. 35, No. 4, pp. 607-616, 1999.
- [14] E. M. Jafarov, M. N. A. Parlakci, Y. Istefanopulos, "A new variable structure PID-controller design for robot manipulators", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol.13, No.1, pp. 122-130, 2005.
- [15] S. Islam, X. P. Liu. "Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.58, No.6, pp. 2444-2453, 2011.
- [16] Z. Man, AP. Paplinski, HR. Wu, "A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators", *IEEE Trans Automat Control*, Vol.39, No.12, pp.2464-2490,1994.
- [17] M. Van, SS. Ge, H. Ren, "Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control", *IEEE Trans Cybern*, Vol.47, No.7, pp.1681-1693, 2017.
- [18] L. Wang, T. Chai, L. Zhai, "Neural-network-based terminal sliding-mode control of robotic manipulators including actuator dynamics", *IEEE Trans Ind Electron*, Vol.56, No.9, pp.3296-3304, 2009.
- [19] S. Mobayen, F. Tchier, L. Ragoub, "Design of an adaptive tracker for n-link rigid robotic manipulators based on super-twisting global nonlinear sliding mode control", *International journal Systems Science*, Vol.48, No.9, pp.1990-2002, 2017.
- [20] CS. Jeong, JS. Kim, SI. Han, "Tracking error constrained super-twisting sliding mode control for robotic systems", *International journal of control automatic Systems*, Vol.16, No.2, pp.804-814, 2018.
- [21] A. Goel, A. Swarup, "MIMO uncertain nonlinear system control via adaptive high-order super twisting sliding mode and its application to robotic manipulator", *Journal of Control Autom Elect Sys*, Vol.28, No.1, pp.36-49, 2017.
- [22] K. Lochan, BK. Roy, B. Subudhi, "Robust tip trajectory synchronisation between assumed modes modelled two-link flexible manipulators using second-order PID terminal SMC", *Robot Auton Sys*, Vol.97, pp.108-124, 2017.
- [23] S. Ding, S. Li, WX. Zheng, "New approach to second-order sliding mode control design", *IET Control Theory Appl*, Vol.7, No.18, pp.2188-2196, 2013.
- [24] X. Tang, CK. Tang, H. Li, "A backstepping robust control method for free-floating space robot system with dual-arms", In: *Proc. of the IEEE international conference on robotics and biomimetics*, , Thailand, pp761-765, 2011.
- [25] M. Boukattaya, N. Mezghani, T. Damak "Adaptive nonsingular fast terminal sliding-mode control for the tracking problem of uncertain dynamical systems", *ISA Trans*, Vol.77, pp.1-19, 2018.
- [26] S. Mondal, C. Mahanta, "Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators", *Journal of The Franklin Institute*, Vol.351, No.4, pp.2356-2377, 2014.
- [27] Y. Shanchao, Z. Junyong, "Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators", *ISA Trans*, Vol.90, pp.41-51, 2019.
- [28] H. Qinglei, X. Liang, Z. Aihua, "Adaptive backstepping trajectory tracking control of robot manipulator", *Journal of The Franklin Institute*, Vol. 349, pp.1087-1105, 2012.
- [29] A.F Amer, A.S. Elsayed, M.E. Wael, "Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory

- fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators”, *Applied Soft Computing*, Vol.11, pp.4943-4953, 2011.
- [30] H.V.A Truong, D.T Tran, X.D To, K.K Ahn, M Jin, “Adaptive Fuzzy Backstepping Sliding Mode Control for a 3-DOF Hydraulic Manipulator with Nonlinear Disturbance Observer for Large Payload Variation”, *Applied Sciences*, Vol. 9, No.16, 3290, 2019.
- [31] J. Zhou, Q. Zhang, “Adaptive Fuzzy Control of Uncertain Robotic Manipulator”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 18, 2018.
- [32] W. Min, Q. Liu, “An improved adaptive fuzzy backstepping control for nonlinear mechanical systems with mismatched uncertainties” *Automatika*, Vol.60, No.1, pp. 1-10, 2019.
- [33] X. Chen, W.W. Tan, “Tracking control of surface vessels via fault-tolerant adaptive backstepping interval type-2 fuzzy control”, *Ocean Engineering, Elsevier*, Vol.70, pp. 97-109, 2013.
- [34] S. Zeghlache, A. Djerioui, L. Benyettou, T. Benslimane, H. Mekki, A. Bouguerra, “Fault tolerant control for modified quadrotor via adaptive type-2 fuzzy backstepping subject to actuator faults”, *ISA Transactions*, Vol.95, pp. 330-345, 2019.
- [35] A. A. Jafari, S. M. A. Mohammadi, M. H. Naseriyeh, “Adaptive type-2 fuzzy backstepping control of uncertain fractional-order nonlinear systems with unknown dead-zone”, *Applied Mathematical Modelling, Elsevier*, Vol.69, pp. 506-532, 2019.
- [36] Q.D. Le, H.J. Kang, “Finite-Time Fault-Tolerant Control for a Robot Manipulator Based on Synchronous Terminal Sliding Mode Control”, *Appl. Sci.*, Vol.10, pp. 1-15, 2020.
- [37] A.A.G. Siqueiraa, M.H. Terrab, C Buosib. Fault-tolerant robot manipulators based on output-feedback  $H_\infty$  controllers. *Robotics and Autonomous Systems*.2007; 55:785-794.
- [38] B. Xiao, S. Yin and H. Gao, “Reconfigurable Tolerant Control of Uncertain Mechanical Systems With Actuator Faults: A Sliding Mode Observer-Based Approach”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.26, pp.1249-1258, 2018.
- [39] H. Huang, W. He, J. Li, B. Xu, C. Yang, W. Zhang, “Disturbance Observer-Based Fault-Tolerant Control for Robotic Systems With Guaranteed Prescribed Performance”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, pp. 1-12, 2020.
- [40] M. Van, X.P. Do, M. Mavrovouniotis, “Self-tuning fuzzy PID-nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators”, *ISA Trans*, Vol.96, pp.60-68, 2020.
- [41] S.Y. Yi, M.J. Chung, “A robust fuzzy logic controller for robot manipulators with uncertainties”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol.4, pp.706-713, 1997.
- [42] J. L. Meza, V. Santibanez, R. Soto, M. A. Llama, “Fuzzy Self-Tuning PID Semiglobal Regulator for Robot Manipulators”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.6, pp. 2709-2717, 2012.
- [43] J. Tavoosi, F. Mohammadi, “A New Type-II Fuzzy System for Flexible-Joint Robot Arm Control”, In: *Proc. of the IEEE of the 6th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, Sanandaj, Iran, pp. 1-4, 2019.
- [44] J. Beata, “Fuzzy logic controller for robot manipulator control system”, In: *Proc. of the IEEE international conference on Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE)*, Raławice, pp. 77-80, 2018.
- [45] Z. Andrew, J. Samuel, “A review of control algorithms for autonomous quadrotors”, *open journal of applied science*, Vol.4, pp.547-556, 2014.
- [46] P.J. Gaidhane, M.J. Nigam, A. Kumar, P.M. Pradhan, “Design of interval fuzzy type-2 precompensated PID controller applied to two-DOF robotic manipulator with variable payload”, *ISA Trans*, Vol.89, pp.169-185, 2019.
- [47] R. Hayat, M. Leibold, M. Buss, “Robust-Adaptive Controller Design for Robot Manipulators Using the  $H_\infty$  Approach”, *IEEE Access*, Vol.6, pp.51626-51639, 2018.
- [48] Z. Yu, G. Cai, “Robust adaptive control of a 6-DOF space robot with flexible panels”, *International Journal of Dynamics and Control*, Vol.7, pp.1370-1378, 2019.
- [49] A. Boubakir, “Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés”, *Magister Thesis*, Algeria, Military polytechnic school, 2007.
- [50] Y. Fouad, B. Omar, H. Mustapha, R. Nassim, “Observer-based Adaptive Fuzzy Backstepping Tracking Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle Powered by Li-ion Battery”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol.84, pp.179-197, 2016.
- [51] N. Bounar, A. Boulkroune, F. Boudjema, M. M’Saad, M. Farza, “Adaptive fuzzy vector

control for a doubly-fed induction motor”, *Neurocomputing*, Vol.151, pp.756-769, 2015.

- [52] L. Yi-Min, Y. Yang, L. Li, “Adaptive Backstepping Fuzzy Control Based on Type-2 Fuzzy System”, *Journal of Applied Mathematics*, Vol.12, 2012.
- [53] F. Yang, R. Yuan, J. Yi, G. Fan, X. Tan, “Backstepping Based Type-2 Adaptive Fuzzy Control for a Generic Hypersonic Flight Vehicle” In: *Proc. of the 2013 Chinese Intelligent Automation Conference*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Berlin, Vol. 254. Pp.169-177, 2013.

## Annexe A

Les variables suivantes sont définies par:

$$\begin{cases} c_i = \cos(q_i), & c_{ij} = \cos(q_i + q_j) \\ s_i = \sin(q_i), & s_{ij} = \sin(q_i + q_j) \end{cases}$$

La matrice d'inertie est donnée par:

$$M(q) = \begin{bmatrix} I_1 + I_2c_{23}^2 + I_2c_2^2 + I_4c_2c_{23} & I_5s_{23} + I_6s_{23} & I_5s_{23} \\ I_5s_{23} + I_6s_2 & I_7 + I_4c_3 & I_8 + 0.5I_4c_3 \\ I_3s_{23} & I_8 + 0.5I_4c_3 & I_9 \end{bmatrix}$$

Où:

$$I_1 = I_{yy1} + I_{xx2} + m_2d_2(d_2 + e) + m_3d_2^2 + I_{xx3} + I_{xt} + \dots + m_t d_2^2 + I_{M1}$$

$$I_2 = I_{yy3} - I_{xx3} + I_{yyt} - I_{xtt} + m_t l_3^2$$

$$I_3 = I_{yy2} - I_{xx2} + m_3 l_2^2 + m_t l_2^2$$

$$I_4 = m_3 l_2 l_3 + 2m_t l_2 l_3$$

$$I_5 = 0.5m_3 l_3 d_2 + m_t l_3 d_2$$

$$I_6 = 0.5m_2 l_2 (d_2 + e) + m_3 l_2 d_2$$

$$I_7 = I_{zz2} + I_{zz3} + m_3 l_2^2 + I_{zzt} + m_t (l_2^2 + l_3^2) + I_{M2}$$

$$I_8 = I_{zz3} + I_{zzt} + m_t l_3^2$$

$$I_9 = I_8 + I_{M3}$$

$I_{Mi} (i = 1, \dots, 3)$  Sont les moments d'inertie des différents moteurs

$I_{xxt}, I_{yyt}, I_{zzt}$  Représente les moments d'inertie totaux par rapport aux axes principaux de l'effecteur.

Le vecteur de variable d'état des termes de gravité est obtenu par:

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -(m_3 l_2 + 0.5m_2 l_2) g c_2 - 0.5m_3 l_3 g c_{23} \\ -0.5m_3 l_3 g c_{23} \end{bmatrix}$$

La matrice jacobienne est définie comme:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -s_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) - d_2c_1 & -c_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & -c_1(l_3s_{23}) \\ c_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) - d_2s_1 & -s_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & -s_1(l_3s_{23}) \\ 0 & -(l_2c_2 + l_3c_{23}) & -(l_3c_{23}) \end{bmatrix}$$

La matrice de coriolis et les forces centrifuges sont définies comme suites:

$$V_m(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} = \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{bmatrix}$$

Tel que:

$$V_{m1} = -(2(I_3s_2c_2 + I_2s_{23}c_{23}) + I_4(c_2s_{23} + s_2c_{23}))\dot{q}_1\dot{q}_2 - (2I_2s_{23}c_{23} + I_4c_2s_{23})\dot{q}_1\dot{q}_3 + (I_6c_2 + I_5c_{23})\dot{q}_2^2 + (2I_5c_{23})\dot{q}_2\dot{q}_3 + (I_5c_{23})\dot{q}_3^2$$

$$V_{m2} = (I_3c_2s_2 + I_2c_{23}s_{23} + 0.5I_4(s_2c_{23} + c_2s_{23}))\dot{q}_1^2 - (I_4s_3)\dot{q}_2\dot{q}_3 - (0.5I_4s_3)\dot{q}_3^2$$

$$V_{m3} = (I_2s_{23}c_{23} + 0.5I_4c_2s_{23})\dot{q}_1^2 + (0.5I_4s_3)\dot{q}_2^2$$

- Messes des différentes liaisons

Table 2. Messes des différentes liaisons

$m_2 = 17.40 \text{ Kg}$	$m_3 = 5.04 \text{ Kg}$	$m_4 = 0.82 \text{ Kg}$
$m_5 = 0.35 \text{ Kg}$	$m_6 = 0.09 \text{ Kg}$	$m_t = m_4 + m_5 + m_6$

- Paramètres géométriques

Table 3. Paramètres géométriques

$d_2 = 149.0$ 9 mm	$l_2 = 431$ 8 mm	$l_3 = 433.07$ mm	$e = 1$ mm
-----------------------	---------------------	----------------------	---------------

- Paramètres d'inerties

Table 4. Paramètres d'inerties

The liaison	$I_{xxi}$ [Kgm <sup>2</sup> ]	$I_{yyi}$ [Kgm <sup>2</sup> ]	$I_{zz_i}$ [Kgm <sup>2</sup> ]	$I_{Mi}$ [Kgm <sup>2</sup> ]
1	-	$350 \times 10^{-3}$	-	1.14
2	$130 \times 10^{-3}$	$524 \times 10^{-3}$	$539 \times 10^{-3}$	4.71
3	$192 \times 10^{-3}$	$15.4 \times 10^{-3}$	$212 \times 10^{-3}$	0.83
4	$1.30 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-3}$	-
5	$0.30 \times 10^{-3}$	$0.30 \times 10^{-3}$	$0.40 \times 10^{-3}$	-
6	$0.04 \times 10^{-3}$	$0.15 \times 10^{-3}$	$0.15 \times 10^{-3}$	-
4+5+6	$1.64 \times 10^{-3}$	$2.25 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-3}$	-