



## Simulation Et Régulation Par Logique Floue D'une Colonne d'Absorption Industrielle

By M. Selatnia, I. Zidane, H. Zebiri, R. Illoul & Et M.S. Boucherit

**Résumé-** Ce travail consiste en la modélisation, la simulation dynamique et enfin la régulation d'une colonne d'absorption industrielle destinée à extraire le CO<sub>2</sub>, du gaz naturel en utilisant une solution aqueuse de methyldiéthanolamine (MDEA). Nous présentons d'abord le modèle mathématique estimant la concentration du CO<sub>2</sub> et comparons la réponse du modèle avec celle du système en réponse à une variation échelon sur l'entrée. Nous simulons la colonne d'absorption industrielle en boucle ouverte, puis nous étudions sa réponse à un échelon de perturbation en boucle fermée avec une régulation classique PID.

Enfin, nous appliquons à notre colonne deux types de commande floues avec respectivement des fonctions d'appartenance triangulaires et gaussiennes. Les résultats obtenus pour les différentes simulations sont satisfaisants.

**Motsclés:** colonne d'absorption; modélisation; methyldiéthanolamine (MDEA); régulation pid; logique floue; commande floue.

**GJRE-G Classification:** FOR Code: 290502



*Strictly as per the compliance and regulations of:*



RESEARCH | DIVERSITY | ETHICS

# Simulation Et Régulation Par Logique Floue D'une Colonne d'Absorption Industrielle

M. Selatnia <sup>α</sup>, I. Zidane <sup>σ</sup>, H. Zebiri <sup>ρ</sup>, R. Illoul <sup>ω</sup> & Et M.S. Boucherit <sup>¥</sup>

**Résumé-** Ce travail consiste en la modélisation, la simulation dynamique et enfin la régulation d'une colonne d'absorption industrielle destinée à extraire le CO<sub>2</sub>, du gaz naturel en utilisant une solution aqueuse de methyldiéthanolamine (MDEA). Nous présentons d'abord le modèle mathématique estimant la concentration du CO<sub>2</sub> et comparons la réponse du modèle avec celle du système en réponse à une variation échelon sur l'entrée. Nous simulons la colonne d'absorption industrielle en boucle ouverte, puis nous étudions sa réponse à un échelon de perturbation en boucle fermée avec une régulation classique PID.

Enfin, nous appliquons à notre colonne deux types de commande floues avec respectivement des fonctions d'appartenance triangulaires et gaussiennes. Les résultats obtenus pour les différentes simulations sont satisfaisants.

**Motsclés:** colonne d'absorption ; modélisation ; methyldiéthanolamine (MDEA) ; régulation pid ; logique floue ; commande floue.

## I. INTRODUCTION

La colonne d'absorption est une unité de séparation physico-chimique largement utilisée en chimie et en biologie. Il s'agit en général d'un tube dans lequel on passe un ou plusieurs mélanges gazeux et qui permet de séparer un ou plusieurs composés du mélange principal. Elle est largement utilisée pour la séparation des gaz acides (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) du gaz naturel.

Le modèle de la colonne d'absorption industrielle présenté dans ce papier est un modèle dynamique qui consiste en un ensemble d'équations non linéaires aux dérivées partielles obtenu à partir de considérations sur les bilans de matière du CO<sub>2</sub> et du MDEA dans les phases gazeuse et liquide [1,2], il prend en compte le gradient thermique le long de la colonne d'absorption. Le bilan énergétique de la colonne industrielle est également posé.

Quelques études ont été publiées sur la modélisation et la commande de la colonne d'absorption. Crosby and Durbin [3] étudient les performances d'un régulateur d'état. Roffel [4] développe un régulateur sous optimal avec contraintes d'état. Darwish and Fantin [5] utilisent la commande décentralisée avec placement de pôles. Petrovsky [6] développe un régulateur PI multivariable. Najim [7,8] développe un régulateur auto-ajustable dans le cas de

l'absorption du CO<sub>2</sub> par une solution de diéthanolamine. Il reprendra le problème par la suite avec une commande prédictive [9].

Peu d'études ont par contre été publiées concernant la modélisation et la simulation de l'absorption du CO<sub>2</sub> par une solution aqueuse de MDEA ou de MEA en milieu industriel [10-12]. Pour le modèle développé dans notre étude, il nous a semblé intéressant de considérer la logique floue pour la commande de la colonne car elle permet d'obtenir de bonnes performances pour des processus à dynamique complexe. Nous développerons en première étape une régulation PID pour comparer les performances des techniques de régulation classiques avec celles de la commande par logique floue.

## II. MODELISATION ET SIMULATION EN BOUCLE OUVERTE DE LA COLONNE INDUSTRIELLE

La colonne d'absorption présentée ici se situe à Khrechba et fait partie du projet In Salah Gaz, elle permet de prélever du CO<sub>2</sub> du gaz naturel en utilisant une solution aqueuse de methyldiéthanolamine (MDEA) comme liquide de lavage. Elle est du type colonne à garnissage mesurant 8 mètre de hauteur et 4 m de diamètre. Le garnissage disposé en vrac est du type anneaux de Pall et est destiné à améliorer la surface de contact entre phases. Pour une meilleure élimination du CO<sub>2</sub> du mélange gazeux, le liquide de lavage (eau+MDEA) circule à contre courant du flux de gaz. La pression et la température de travail sont respectivement de 71.5 bar et 55°C [2].

Lors du contact entre phase liquide et gazeuse sur la surface des anneaux de Pall, le CO<sub>2</sub> passe de la phase gazeuse vers la phase liquide. Cette diffusion est accélérée par réaction chimique du CO<sub>2</sub> avec la MDEA dans la phase liquide. Le débit de MDEA et la concentration du CO<sub>2</sub> en sortie dans le gaz naturel sont respectivement sélectionnés comme variables de commande et de sortie.

Author <sup>α σ ρ ω ¥</sup> : Laboratoire de commande des processus Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, BP 182 Avenue Hassen Badi, El Harrach. e-mail: mouradselatnia@yahoo.fr



Figure 1 : La colonne d'absorption de In Salah Gas (ISG)

a) Equations du modèle

Dans le but de simplifier le modèle, nous avons adopté les hypothèses suivantes [2,13]:

- Il n'y a pas de résistance en phase gazeuse
- La réaction entre le CO<sub>2</sub> et le MDEA est rapide (Ha > 5)
- La dispersion axiale est négligeable dans la phase gazeuse et dans la phase liquid
- La MDEA ne passe pas en phase gazeuse Le bilan de matière sur une tranche élémentaire dz de la colonne pour le CO<sub>2</sub> dans la phase gazeuse s'écrit [2,13,14]:

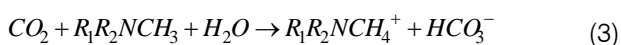
Quantité de soluté à l'entrée z = quantité de soluté à la sortie (z+dz) + quantité de soluté transféré de la phase liquide à la phase gazeuse + accumulation. Ce qui donne :

$$(GC_{Ag})_z = (GC_{Ag})_{z+dz} + \varphi S dz + S \frac{dC_{Ag}}{dt} dz \quad (1)$$

où G (m<sup>3</sup>/s) est le débit volumique du gaz,  $\varphi$  le flux de CO<sub>2</sub> transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide, S la section de la colonne et C<sub>Ag</sub> (mol/m<sup>3</sup>) la concentration du CO<sub>2</sub> dans le gaz. Soit U<sub>G</sub>=G/S (m/s) la vitesse moyenne d'écoulement du gaz, on obtient alors :

$$U_g \frac{dC_{Ag}}{dz} + \varphi = - \frac{dC_{Ag}}{dt} \quad (2)$$

La réaction chimique entre le CO<sub>2</sub> et le MDEA est [10-12]:



La vitesse de réaction r<sub>A</sub> a la forme suivante [14,15]:

$$r_A = k C_{AL} C_{BL} \quad (4)$$

Où k est la constante de la vitesse de réaction [14,15]:

$$k = 2,9610^5 \exp\left(-\frac{5332,8}{T}\right) \quad (5)$$

C<sub>AL</sub> est la concentration du CO<sub>2</sub> dans la phase liquide et C<sub>BL</sub> la concentration du MEA dans la phase

liquide. Le bilan de matière pour le CO<sub>2</sub> dans la phase liquide donne finalement:

$$\varphi = [k C_{AL} C_{BL}] \quad (6)$$

Ce qui signifie que la totalité du CO<sub>2</sub> transféré dans la phase liquide réagit avec le MDEA.

Le bilan de matière pour le MDEA dans la phase liquid donne :

$$(LC_{Bl})_z = (LC_{Bl})_{z+dz} - [k C_{AL} C_{BL}] S dz - S \frac{dC_{Bl}}{dt} dz \quad (7)$$

où L est le débit volumique du liquide. En tenant compte de (5) et en notant par UL = L/S (m/s) la vitesse moyenne d'écoulement du flux liquide on obtient :

$$U_l \frac{dC_{Bl}}{dz} - \varphi = - \frac{dC_{Bl}}{dt} \quad (8)$$

Notre colonne d'absorption est finalement décrite par le système d'équations aux dérivées partielles suivantes:

$$\begin{cases} U_g \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} + \varphi = - \frac{\partial C_{Ag}}{\partial t} \\ U_L \frac{\partial C_{BL}}{\partial z} - \varphi = \frac{\partial C_{BL}}{\partial t} \end{cases} \quad (9)$$

La procédure pour calculer le flux  $\varphi$  est donnée en [2] d'après [14-16].

En dernier lieu, nous considérons les conditions aux limites qui sont pour la phase gazeuse la concentration du CO<sub>2</sub> en bas de la colonne C<sub>Age</sub> et pour la phase liquide la concentration du MDEA en haut de la colonne C<sub>BLE</sub>.

$$\begin{cases} C_{Ag}|_{z=0} = C_{Age} \\ C_{BL}|_{z=h} = C_{BLE} \end{cases} \quad (10)$$

La réaction au sein de la colonne industrielle induit un fort dégagement de chaleur et l'apparition d'un gradient de température tout au long de la colonne ; la variation de température est d'environ 5°C entre l'entrée et la sortie de la colonne, ce qui nous amène à établir un bilan énergétique permettant de décrire l'évolution de la température et son effet sur les différentes concentrations le long de la colonne [16] :

$$\begin{cases} U_g \frac{\partial T_g}{\partial z} + \frac{a.h_{g|l}(T_l - T_g)}{\left[ \sum_i cp^g_i C^g_i \right]} = \frac{\partial T_g}{\partial t} \\ -U_L \frac{\partial T_l}{\partial z} + \frac{1}{\sum_i cp^l_i C^l_i} \left[ \Delta H_{r_A} - a.h_{g|l}(T_l - T_g) \right] = \frac{\partial T_l}{\partial t} \end{cases} \quad (11)$$

Avec :

C<sub>i</sub><sup>g</sup> : la concentration en phase gazeuse à l'interface (mol/m<sup>3</sup>)

C<sub>i</sub><sup>l</sup> : la concentration en phase liquide à l'interface (mol/m<sup>3</sup>)

- $cp_i^g$ : Chaleur spécifique dans la phase gazeuse à l'interface (J/mol.K)
- $h_{g/l}$ : coefficient de transfert de chaleur (convection) (J/m<sup>2</sup>.K.s)
- $T_l$ : température du liquide (K)
- $T_g$ : température du gaz (K)
- $\Delta H_r$ : l'enthalpie de la réaction (J/mol)
- $cp_i^l$ : la chaleur spécifique dans la phase liquide à l'interface (J/mol.K)

On prend finalement en compte les conditions aux limites pour la température qui sont les températures respectives du gaz et du liquide en entrée de la colonne.

$$\begin{cases} T_g \Big|_{z=0} = T_{ge} , \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \\ T_l \Big|_{z=h} = T_{le} , \frac{\partial T_g}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

b) Validation Du Modèle

Un test a pu être effectué sur notre colonne d'absorption industrielle pour comparer la concentration du CO<sub>2</sub> en sortie donnée par le modèle avec celle du système et ce pour une variation de l'entrée du type échelon de 10 t/h. Les données ont pu être recueillies sur un horizon de temps de 6800 secondes. Les résultats sont groupés dans la figure 2 où on représente respectivement, les débits de MDEA, de gaz et les concentrations du CO<sub>2</sub> en sortie de la colonne et celles données par le modèle [2].

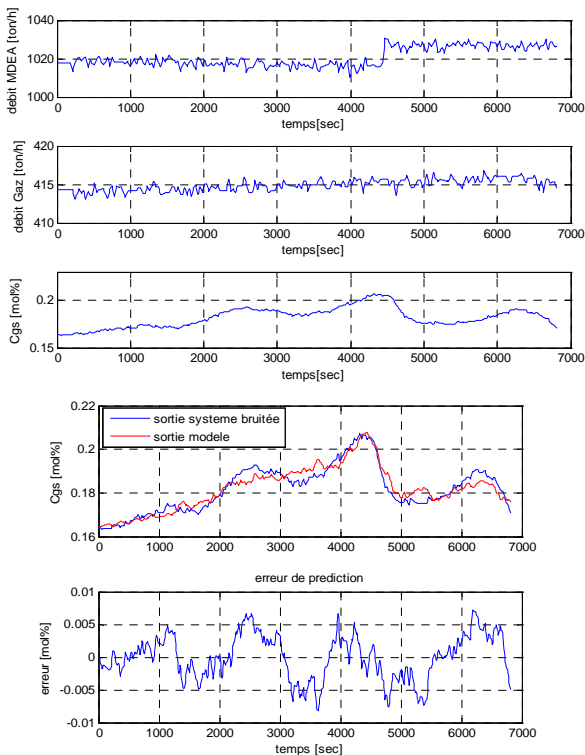


Figure 2 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie du système et du modèle

On note que la dynamique des concentrations de CO<sub>2</sub> en sortie de la colonne obtenue théoriquement agrée avec les résultats expérimentaux.

c) Simulation en boucle ouverte de la colonne industrielle

En considérant les équations (2) et (8), le modèle dynamique de la colonne d'absorption est un système aux paramètres répartis non linéaires. Les résultats de la simulation en boucle ouverte sont présentés en figures 3 et 4.

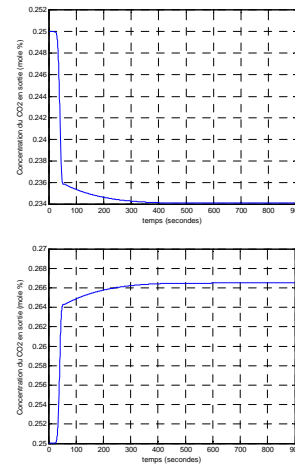


Figure 3 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 5% sur la concentration en entrée du gaz

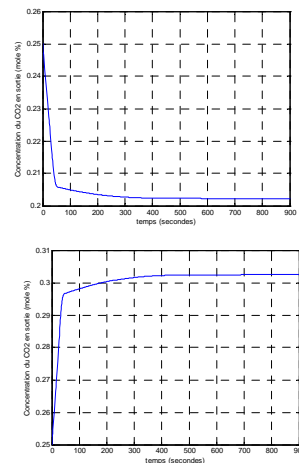


Figure 4 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 10% sur le débit du gaz

La simulation montre que le système est stable. Il présente un temps mort en réponse à un échelon de perturbation sur la concentration en entrée du CO<sub>2</sub> dû à la propagation du gaz le long de la colonne d'absorption.

### III. REGULATION PID DE LA COLONNE D'ABSORPTION INDUSTRIELLE

Nous appliquons une régulation PID au modèle dynamique de notre colonne d'absorption. Une commande échantillonnée est choisie pour faciliter la simulation avec une période de 10 secondes. La référence pour la concentration de CO<sub>2</sub> en sortie est choisie égale à 0.25mole %, ce qui correspond à une concentration de 7.05 mole CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Les paramètres du régulateur PID ont été optimisés par essai/erreur.

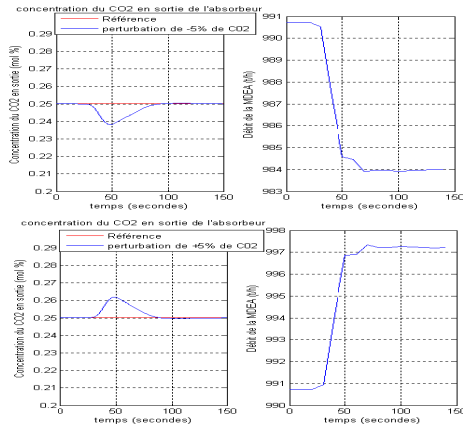


Figure 5 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de ± 5% sur la concentration de gaz

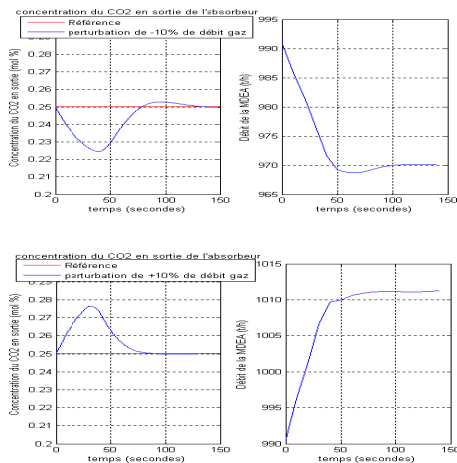


Figure 6 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de ± 10% sur le débit du gaz

Les résultats obtenus en simulation sont satisfaisants, le régulateur PID annule l'erreur en régime permanent et assure une réponse rapide grâce à l'action dérivée. Le système présente en régulation un certain comportement asymétrique dû à la forte non linéarité de la sortie par rapport à la commande choisie qui est le débit du liquide de lavage.

### IV. COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DE LA COLONNE D'ABSORPTION INDUSTRIELLE

Le concept de logique floue a été introduit par Zadeh [17] en 1965. Ce concept s'est avéré très utile pour des procédés non linéaires difficiles à modéliser et diverses applications ont été développées pour des processus industriels dans le domaine de la supervision ou de la commande du procédé [18].

#### a) Structure de la commande de la colonne d'absorption

Un système flou est un système de prise de décisions à base de connaissance particulières composé de quatre modules principaux, à savoir : la base de règles, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification. Le régulateur flou [19,20] n'est qu'un cas particulier de système flou destiné à calculer la commande

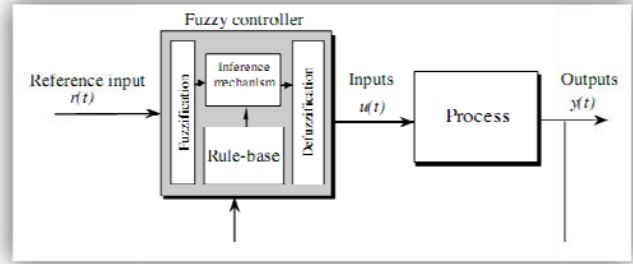


Figure 7 : Structure d'un contrôleur flou

On distingue deux types de systèmes flous :

- Le modèle de Mandani où les conclusions sont des règles floues
- Le modèle de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) où les conclusions sont directement numériques.

Le contrôleur flou choisi ici possède deux entrées  $e$   $\Delta e = e(k) - e(k-1)$  et la sortie est  $\Delta u$ , il est ainsi est du type PI. Pour simplifier la synthèse, nous avons choisi le modèle TSK où les conclusions sont directement numériques [21].

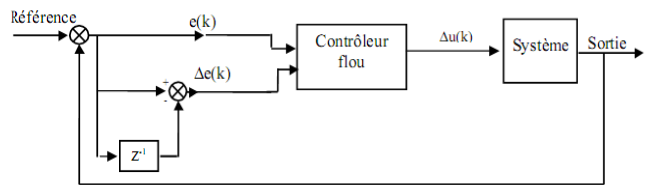


Figure 8 : Structure de la boucle de régulation floue

Pour notre problème, nous avons choisi pour les deux entrées d'abord des fonctions d'appartenances triangulaires, puis des fonctions gaussiennes et ce afin de faire une comparaison entre ces deux approches [2]. On a choisi dans les deux cas 5 fonctions d'appartenance en entrée couvrant tout l'univers du discours : PG (Positif Grand), PP (Positif Petit), Z (Zéro), NP (Négatif Petit), NG (Négatif Grand)

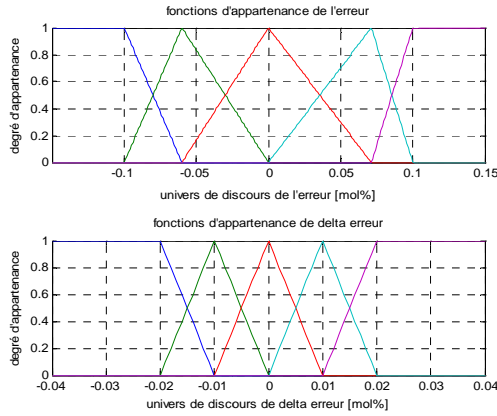


Figure 9 : Fonctions d'appartenance triangulaires

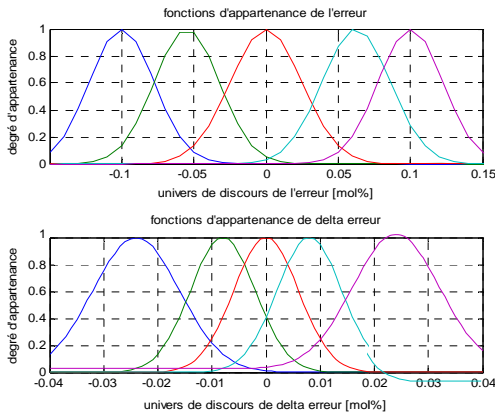


Figure 10 : Fonctions d'appartenance gaussiennes

La table des règles a été synthétisée en collaboration avec les opérateurs de l'installation afin de profiter de leur expérience, il y a eu un ajustement pour aboutir aux performances désirées. En termes d'agrégation des règles cette table a une forme antisymétrique [22,23].

TABLEAU 1 : TABLE DES REGLES

$\Delta u$ [ton/h]		$e(k)$				
		NG	NP	Z	PP	PG
$\Delta e(k)$	NG	+25	+20	+3	-5	-16
	NP	+22	+18	+2	-8	-18
	Z	+20	+12	0	-12	-20
	PP	+18	+8	-2	-18	-22
	PG	+16	+5	-3	-20	-25

Les resultants pour les deux types de fonction d'appartenance sont présentés ci-dessous.

b) Résultats de simulations pour des fonctions d'appartenance triangulaires

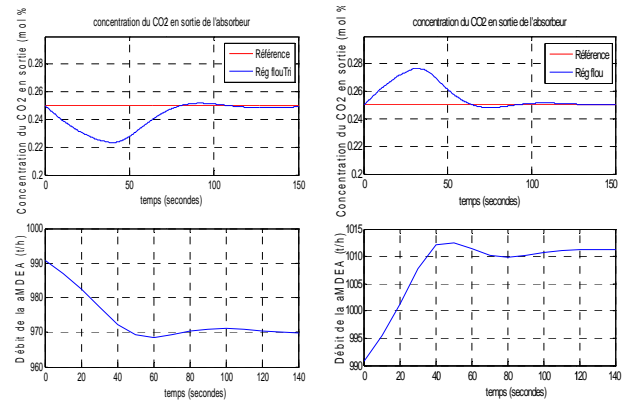


Figure 11 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide pour un échelon de perturbation de +/-10% sur le débit du Gaz

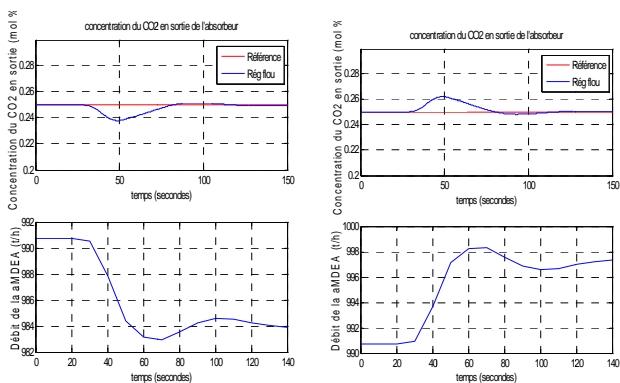


Figure 12 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide pour un échelon de perturbation de +/-5% sur la concentration du CO<sub>2</sub> en entrée

c) Résultats de simulations pour des fonctions d'appartenance gaussiennes

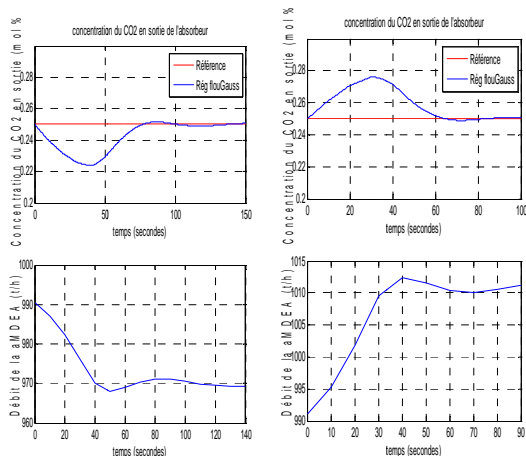


Figure 13 : Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide pour un échelon de perturbation de +/-10% sur le débit du Gaz

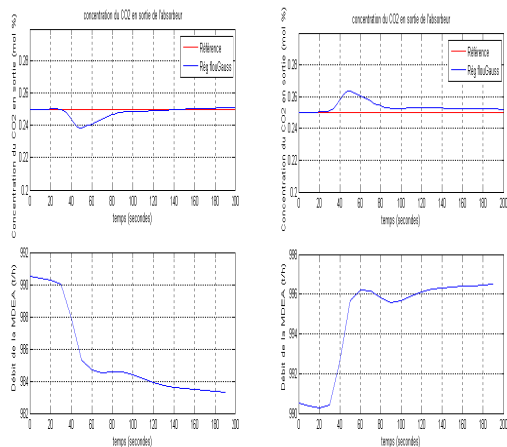


Figure 14 Concentration du CO<sub>2</sub> en sortie et débit du liquide pour un échelon de perturbation de +/-5% sur la concentration du CO<sub>2</sub> en entrée

d) Comparaison Des Régulateurs Flou

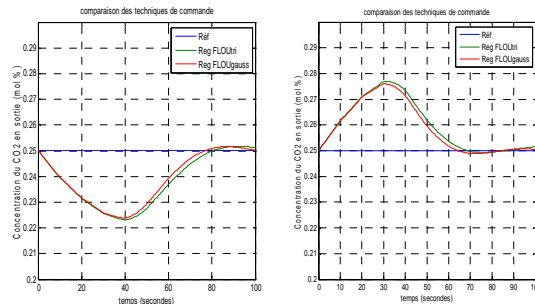


Figure 15 : Comparaison entre les régulateurs flous pour des perturbations de +/-10 sur le débit du Gaz

e) Comparaison du régulateur flou gaussien et PID

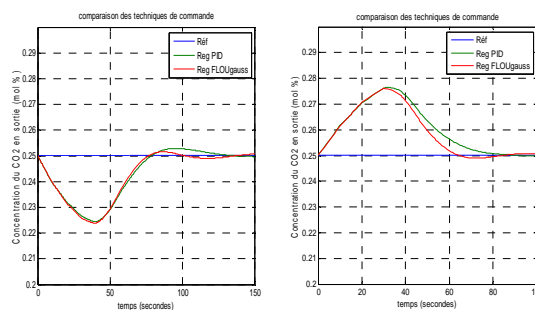


Figure 16 : Comparaison entre le régulateur flou et PID pour des perturbations de +/-10% sur le débit du gaz

f) discussion des résultats

Les figures 11 à 14 montrent que le régulateur flou présente de bonnes performances pour les deux types de fonction d'appartenance. La figure 15 montre que le régulateur flou à fonctions d'appartenance gaussiennes donne une réponse plus rapide que celui à fonctions triangulaires. La figure 16 montre que le régulateur flou gaussien présente également de meilleures performances que le régulateur PID.

V. CONCLUSION

Les simulations effectuées montrent que nous obtenons des performances satisfaisantes avec les trois techniques de réglage que ce soit pour les échelons de perturbation sur la concentration de CO<sub>2</sub> ou le débit de gaz. Il faut noter que la régulation floue donne de meilleurs temps de réponse que la régulation classique PID. Nous envisageons d'appliquer des commandes neuronales dans un proche avenir à notre modèle de colonne industrielle.

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. Selatnia and S. Seddari, "Simulation of CO<sub>2</sub> absorption in aqueous solution of

- monoethanolamine (MEA) on a pilot absorption column", Distillation and absorption conference, IChemE, London, England, 2006.
2. I. Zidane et H.Zebiri, Identification multimodèle et commande par logique floue d'une colonne d'absorption industrielle. Projet de fin d'études, ENP, Alger, 2010.
  3. J.E. Crosby and L.D. Durbin, "Design and application of state variable feedback controller for a packed trickle bed column with carbon dioxide absorption", in Joint Automatic Control Conference, West Lafayette, IN, USA, 1976.
  4. B. Roffel, "Control of processes with a state variable inequality constraint", *Automatica*, Vol.17, 1976, pp. 19-28.
  5. M. Darwish and J. Fantin, "Stabilization and control of absorber tower chemical process", Third IFAC/IFIP/IFORS Conference on System Approach for Development, Rabat, 1980.
  6. D. Petrovski, "A design scheme for multivariable output constrained PI regulators with applications to absorption column", *Automatic Control Theory Applications*, Vol. 8, 1980, pp. 61-69.
  7. K. Najim, "Modelling and self-adjusting control of an absorption column", *International Newspaper of Adaptive Control and Processing Signal*, Vol. 5, 1991, pp. 335-345.
  8. K. Najim and M. Chtourou, "Multilevel learning control of an absorption column", *Optimal control applications & Methods*, Vol. 12, n°3, 1991, pp. 189-195.
  9. K. Najim and V. Ruiz, "Long range predictive control of an absorption packed column", *Applied Mathematical Modelling Journal*, Vol. 19, n°1, 1995, pp. 39-45.
  10. R. Idem, M. Wilson, P. Tontiwachwuthikul and A. Chakma, "Pilot Plant Studies of the CO<sub>2</sub> Capture Performances of Aqueous MEA and Mixed MEA/MDEA Solvents at the University of Regina CO<sub>2</sub> Capture Technology Development Plant and the Boundary Dam CO<sub>2</sub> Capture Demonstration Plant", *Ind. Eng. Chem. Res*, Vol. 45, 2006, pp. 2414-242.
  11. P. Tontiwachwuthikul, A. Meisen and C.J. Lim, "CO<sub>2</sub> Absorption by NaOH, MEA and AMP solutions to packed columns", *Chemical Engineering Science*, vol. 47, n° 2, 1992, pp. 381-391.
  12. T. Pintola, P.Tontiwachwuthikul and A.Meisen, "Simulation of pilot plant and industrial CO<sub>2</sub>-MEA absorbers", *Gas separation and purification*, Vol. 7, n° 1, 1993, pp. 47-52.
  13. S. Seddari, Simulation d'une colonne à garnissage d'absorption du CO<sub>2</sub> par une solution aqueuse de monoéthanolamine à 25°C et 40 °C", Thèse de Magister, ENP, Alger, 2004.
  14. L. Deleye and G.F. Froment, "Rigorous simulation and design of columns for gas absorption and chemical reactions packed columns", *Comp. Chem. Eng.*, Vol.10, n°5, 1986, pp. 493-504.
  15. P.Trambouze, H.V. Landegheim et J.P Wauquier, *Les réacteurs chimiques, conception/calcul/mise en œuvre*, Paris, Technip, 1984, pp. 217-218.
  16. A. Bedelbayev, T. Greer and B. Lie, "Model based control of absorption tower for CO<sub>2</sub> capturing", *Telemark University College, Porsgrunn, Norvège*, 2008, p. 11
  17. L. Zadeh, " Fuzzy set", *Information and Control*, Vol. 8, 1965.
  18. A. Gad and M. Farooq, "An overview of fuzzy logic in power and control systems", *Proc. of the 46<sup>th</sup> IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 3, 2003, pp. 1047-1050.
  19. H.R. Bühler, *Commande Floue*, Editions presses polytechniques et universitaires Romandes, 1994
  20. L. Gacogne, "Eléments de logique floue, Edition Hermes, 1997.
  21. S. Bezzaoucha, *Commandes Floues d'une Colonne d'absorption*, Thèse de Magister, ENP, Alger, 2007.
  22. C.C. Lee, "Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic control- Part I and part II ", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol 20, n° 2,1990, pp. 404-435
  23. O. Landolt, P. Marchal et E. Vittoz (CSEM), " Principes de la Logique Floue ", publication MSM, n° 4, 1992.



This page is intentionally left blank

