



GLOBAL JOURNAL OF RESEARCHES IN ENGINEERING: G
INDUSTRIAL ENGINEERING

Volume 15 Issue 3 Version 1.0 Year 2015

Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal

Publisher: Global Journals Inc. (USA)

Online ISSN: 2249-4596 Print ISSN: 0975-5861

Simulation Et Régulation Par Réseaux De Neurones D'une Colonne d'Absorption Industrielle

By M. Selatnia, R. Illoul & Et M.S. Boucherit

Allama Iqbal College of Technology, Pakistan

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_2 , du gaz naturel en utilisant une solution aqueuse de methydiéthanolamine (MDEA). Nous présentons d'abord le modèle mathématique estimant la concentration du CO_2 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 une stratégie de commande neuronale, à savoir la commande non linéaire prédictive neuronale. Les résultats obtenus pour les différentes simulations sont satisfaisants.

Motsclés: *colonne d'absorption; modélisation; methydiéthanolamine (MDEA); régulation pid; réseaux de neurones, commande non linéaire prédictive neuronale (nnpc).*

GJRE-G Classification: FOR Code: 290502



Strictly as per the compliance and regulations of:



© 2015. M. Selatnia, R. Illoul & Et M.S. Boucherit. This is a research/review paper, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 Unported License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), permitting all non commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Simulation Et Régulation Par Réseaux De Neurones D'une Colonne d'Absorption Industrielle

M. Selatnia ^α, R. Illoul ^σ & Et M.S. Boucherit ^ρ

Résumé- Ce travail consiste en la modélisation, la simulation dynamique et enfin la régulation d'une colonne d'absorption industrielle destinée à extraire le CO₂, du gaz naturel en utilisant une solution aqueuse de methyldiéthanolamine (MDEA). Nous présentons d'abord le modèle mathématique estimant la concentration du CO₂ 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 une stratégie de commande neuronale, à savoir la commande non linéaire prédictive neuronale. Les résultats obtenus pour les différentes simulations sont satisfaisants.

Motsclés: *colonne d'absorption; modélisation; methyldiéthanolamine (MDEA); régulation pid; réseaux de neurones, commande non linéaire prédictive neuronale (nnpc).*

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 (CO₂, H₂S) 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 les réseaux de neurones 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 réseaux de neurones.

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ passe de la phase gazeuse vers la phase liquide. Cette diffusion est accélérée par réaction chimique du CO₂ avec la MDEA dans la phase liquide. Le débit de MDEA et la concentration du CO₂ en sortie dans le gaz naturel sont respectivement sélectionnés comme variables de commande et de sortie.

Author α σ ρ : Laboratoire de commande des processus Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, BP 182 Avenue Hassen Badi, El Harrach.



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 CO₂ et le MDEA est rapide (Ha>5)
 - La dispersion axiale est négligeable dans la phase gazeuse et dans la phase liquide
 - La MDEA ne passe pas en phase gazeuse
- Le bilan de matière sur une tranche élémentaire dz de la colonne pour le CO₂ 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.

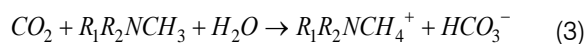
Ce qui donne :

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

où G (m³/s) est le débit volumique du gaz, φ le flux de CO₂ transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide, S la section de la colonne et C_{Ag}(mol/m³) la concentration du CO₂ dans le gaz. Soit U_G=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 CO₂ et le MDEA est [10-12]:



La vitesse de réaction r_A 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_{AL} est la concentration du CO₂ dans la phase liquide et C_{BL} la concentration du MDEA dans la phase liquide. Le bilan de matière pour le CO₂ dans la phase liquide donne finalement:

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

Ce qui signifie que la totalité du CO₂ transféré dans la phase liquide réagit avec le MDEA.

Le bilan de matière pour le MDEA dans la phase liquide 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 U_L = 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 ϕ 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 CO₂ en bas de la colonne C_{Age} et pour la phase liquide la concentration du MDEA en haut de la colonne C_{BLE}:

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

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] :

$$\begin{cases} U_g \frac{\partial T_g}{\partial z} + \frac{a \cdot h_{g/l} (T_l - T_g)}{\left[\sum_i cp_i^g \cdot C_i^g \right]} = \frac{\partial T_g}{\partial t} \\ -U_L \frac{\partial T_l}{\partial z} + \frac{1}{\sum_i cp_i^l \cdot C_i^l} [\Delta H_r \cdot r_A - a \cdot h_{g/l} (T_l - T_g)] = \frac{\partial T_l}{\partial t} \end{cases} \quad (11)$$

Avec :

C_i^g : la concentration en phase gazeuse à l'interface (mol/m³)

C_i^l : la concentration en phase liquide à l'interface (mol/m³)

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/m².K.s)

T_l : température du liquide (K)

T_g : température du gaz (K)

ΔH_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 CO₂ 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 CO₂ en sortie de la colonne et celles données par le modèle [2].

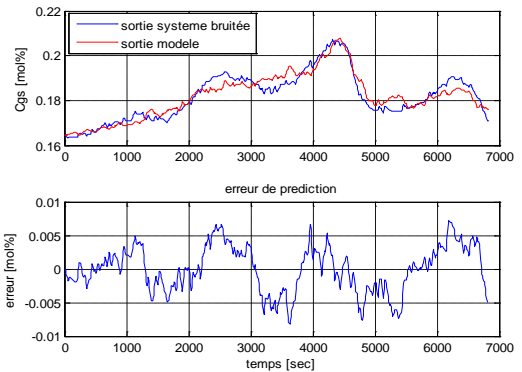
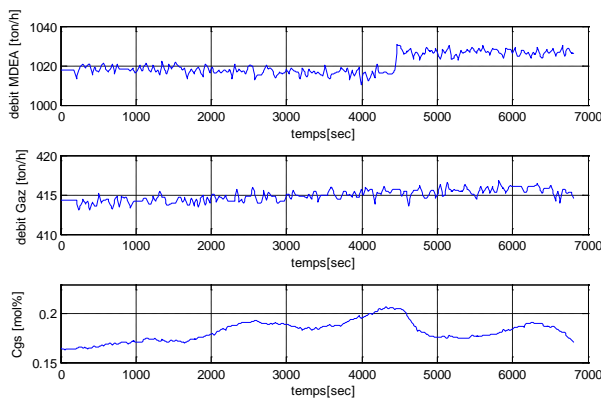


Figure 2 : Concentration du CO₂ en sortie du système et du modèle

On note que la dynamique des concentrations de CO₂ 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 résultants de la simulation en boucle ouverte sont présentés en figures 3 et 4.

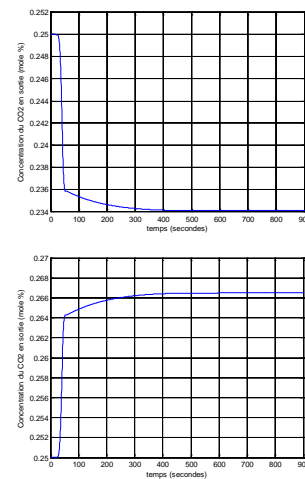


Figure 3 : Concentration du CO₂ en sortie de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 5% sur la concentration en entrée du gaz

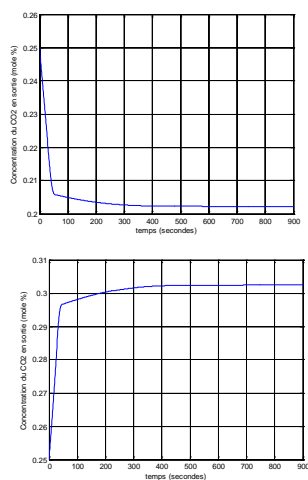


Figure 4 : Concentration du CO₂ en sortie de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 10% sur le débit du gaz

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 CO₂ 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 CO₂ en sortie est choisie égale à 0.25 mole %, ce qui correspond à une concentration de 7.05 mole CO₂/m³. Les paramètres du régulateur PID ont été optimisés par essai/erreur.

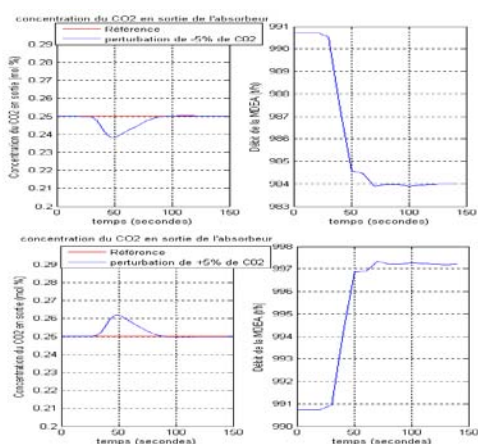


Figure 5 : Concentration du CO₂ en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de ± 5% sur la concentration de gaz

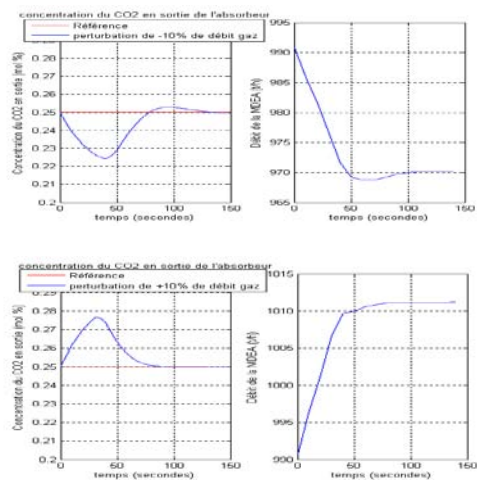


Figure 6 : Concentration du CO₂ en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de ±10 % sur le débit du gaz

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 RESEAUX DE NEURONES DE LA COLONNE D'ABSORPTION INDUSTRIELLE

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des approximateurs universels de fonctions et permettent ainsi d'approcher n'importe quelle fonction non linéaire. Cette propriété motive leur utilisation pour la réalisation de commandes non linéaires par identification d'un modèle donné. Nous envisageons dans notre étude un modèle général pour la synthèse de la commande non linéaire prédictive neuronale (NNPC) [18]-[19].

a) Commande non linéaire prédictive neuronale (NNPC)

Nous prenons pour la commande NNPC une structure d'identification simple série-parallèle. Le réseau de neurones est choisi en essayant de minimiser l'erreur de rétropropagation du gradient. Après plusieurs essais, notre choix s'est arrêté sur un réseau à quatre entrées $u(k), u(k-1), y(k), y(k-1)$ et une seule couche cachée à 15 neurones. L'apprentissage de notre réseau de neurones et le test de validation du modèle neuronal sont présentés dans les figures 7 et 8.

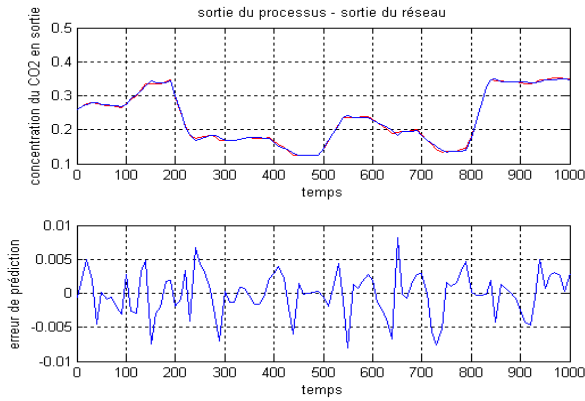


Figure 7 : Identification neuronale de la colonne industrielle

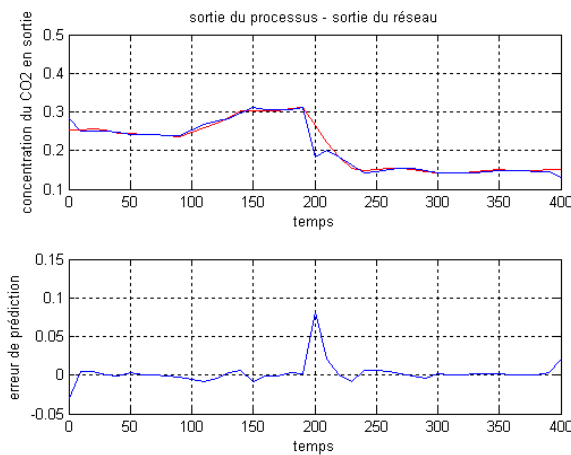


Figure 8 : Validation de l'identification neuronale de la colonne

La stratégie de commande prédictive est basée sur un horizon de prédiction [22]. Le réseau de neurones prédit la réponse du processus sur l'intervalle de temps spécifié. La prédiction est ensuite utilisée par un programme d'optimisation pour déterminer la commande minimisant le critère de performance J ci-dessous sur l'horizon de prédiction considéré :

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_d(t+j) - \hat{y}(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u(t+j-1) - u(t+j-2))^2 \quad (13)$$

Où $U'(t)$ est le vecteur de commandes tests :

$$U'(t) = [u'(t) \dots \dots \dots u'(t + N_u - 1)]^T \quad (14)$$

N_1 et N_2 définissent l'horizon de prédiction, N_u est l'horizon de commande. Y_d est la réponse désirée et \hat{y} est la sortie estimée du modèle. La valeur de ρ détermine la contribution des commandes tests dans le critère de performance. Le critère J est minimisé en utilisant un algorithme d'optimisation itératif en général l'algorithme BFGS qui est une méthode quasi Newton [18,22]. Le schéma de la figure 9 illustre le principe de

la commande prédictive neuronale. Le contrôleur est composé d'un réseau de neurones pour estimer \hat{y} et d'un bloc d'optimisation pour déterminer $U'(t)$.

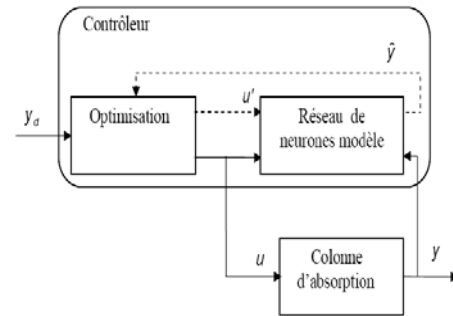


Figure 9 : Commande NNPC de la colonne d'absorption Industrielle

a) Résultats de simulation de la commande NNPC

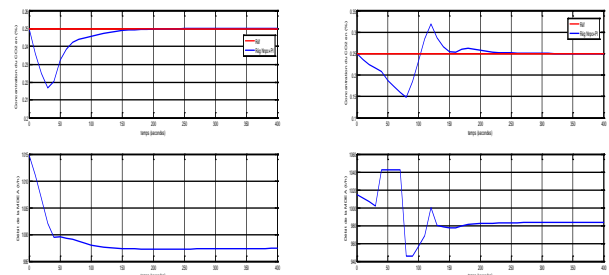


Figure 10 : Concentration de CO₂ en sortie et débit de liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +/-5% sur la concentration de CO₂

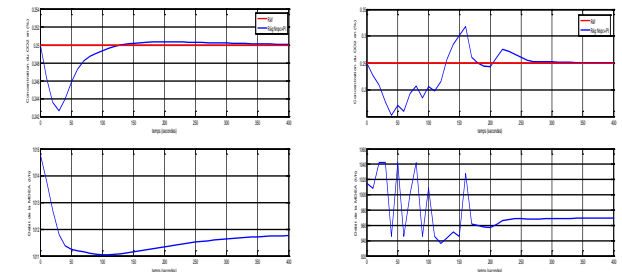


Figure 11 : Concentration du CO₂ en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +/-10% sur le débit de gaz

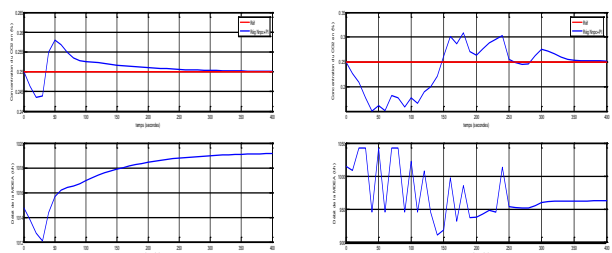


Figure 12 : Concentration du CO₂ en sortie et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +/-5% sur la concentration de CO₂ et +/-10% sur le débit de gaz

A cause des erreurs de modélisation on a normalement une erreur en régime permanent. Pour remédier à ce problème, on a introduit un régulateur PI sur lequel on commute dès que la sortie approche le voisinage de la consigne (10%) (figure 13). Toutes fois la réponse du système présente un comportement asymétrique pour les perturbations sur le débit gaz.

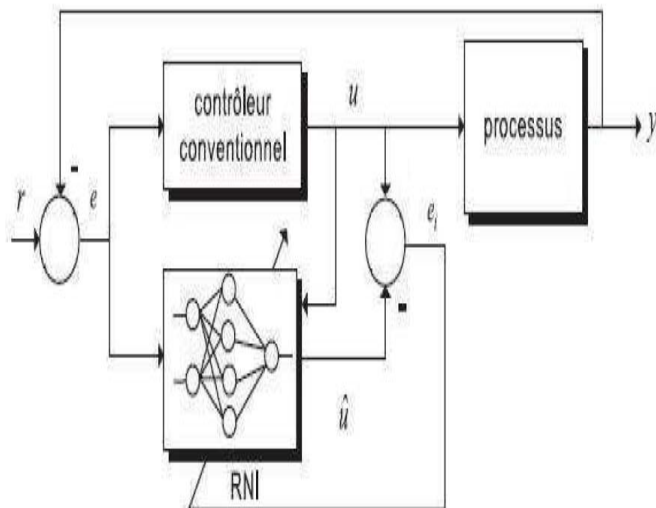


Figure 13 : Commande NNPC avec PI de la colonne d'absorption Industrielle

b) Comparaison de la technique de réglage neuronale et classique

cause de l'algorithme d'optimisation, ce qui donne un temps de réponse relativement long par rapport à une simple régulation PID qui atteint le régime établi pour moins de 100 secondes. la réponse de la commande NNPC est peu oscillatoire du fait du réseau de neurones qui se sature de par et d'autre. Néanmoins, les résultats obtenus sont satisfaisants.

V. CONCLUSION

Les simulations montrent que nous obtenons des performances satisfaisantes avec les deux techniques de réglage que ce soit pour les échelons de perturbation sur la concentration du CO₂ ou sur le débit de gaz. Il faut noter que la régulation PID donne de meilleurs temps de réponse que la commande neuronale du fait de sa simplicité.

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. A. Selatnia and S. Seddari, "Simulation of CO₂ 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 CO₂ Capture Performances of Aqueous MEA and Mixed MEA/MDEA Solvents at the University of Regina CO₂ Capture Technology Development Plant and the Boundary Dam CO₂ Capture Demonstration Plant", Ind. Eng. Chem. Res , Vol. 45, 2006, pp. 2414-242.
11. P. Tontiwachwuthikul, A. Meisen and C.J. Lim, "CO₂Absorption 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 CO₂-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 CO₂ 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 oeuvre, Paris, Technip, 1984, pp. 217-218.

16. A. Bedelbayev, T. Greer and B. Lie, "Model based control of absorption tower for CO₂ capturing", Telemark University College, Porsgrunn, Norvège, 2008, p. 11
17. J. Herault and C. Jutien, *Réseaux de neurones et traitement du signal*, Paris, Edition Hermès, 1994.
18. M. Selatnia, « *Identification et commande par réseaux de neurones d'une colonne d'absorption* », Thèse de Magistère, ENP, Alger, 2010.
19. K. S. Narendra et K. Parthasarathy, ' Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Networks', IEEE Trans. Neural Networks, Vol.1, n° 1, pp. 4-27, (1990).
20. P. Marc., «Le perceptron Multicouche et Son Algorithme de Rétropropagation des Erreurs», Université de Laval, (2004).
21. Data Sheet ISG. CO2 absorber.CO2 control . Ain Salah Gaz
22. Matlab 6.7. 2008

