

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Laboratoire de Commande des Processus



Mémoire de Magister

Spécialité : Automatique

Option : Automatique des Systèmes Industriels

Présenté par :

BEZZAOUCHA Souad

Ingénieur d'Etat en Automatique de l'ENP

Thème :

**DIFFERENTES STRATEGIES DE COMMANDE FLOUE
APPLIQUEES À UNE COLONNE D'ABSORPTION**

Présenté devant le jury composé de :

M^r. M. TADJINE
M^r. R. ILLOUL
M^r. A. SELATNIA
M^r. H. CHEKIREB
M^r. O. STIHI

Professeur, ENP
Chargé de Cours, ENP
Professeur, ENP
Maître de Conférences, ENP
Chargé de Cours, ENP

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

ENP, 2007

Mémoire préparé au Laboratoire de Commande des Processus
10, Avenue Hassen Badi, BP 182, EL-Harrach, Alger, Algérie

ملخص

يهدف هذا العمل الى استعمال الجمل الغامضة في التحكم في أسطوانة الإمتصاص المستعملة لاستخراج غاز CO_2 من مزيج غازي (هواء + CO_2) بالامتصاص بواسطة سائل الغسل MEA. التمثيل النموذجي لهذا النظام بإستعمال ميزانية المادة تمكن من الحصول على معالة لا خطية ذات وسائط موزعة. لتحسين النتائج المتحصل عليها بالتحكم الكلاسيكي PI طبقنا على أسطوانة الإمتصاص ثلاث طرق للتحكم تعتمد على الجمل الغامضة: التحكم الغامض، التحكم العصبيوني , L.E.S.D.F. قدمنا بعض نتائج المحاماة العددية لكل طريقة لإبراز كفاءة أدائها.

الكلمات المفتاحية :

أسطوانة الإمتصاص، معالة ذات مشتقات جزئية، نموذج ذات وسائط موزعة، التحكم PI، التحكم العصبيوني ، L.E.S.D.F.

Abstract:

This work deals with the application of fuzzy control to an absorption packed column destined to remove CO_2 from a gas mixture (air+ CO_2) using an aqueous solution of MonoEthanolAmine (MEA). The model is obtained using mass balance considerations and is non linear with distributed parameters.

In order to improve the results obtained with a classic PI regulator, we applied to our system three control techniques based on fuzzy logics: the simple fuzzy logics, the neuro-fuzzy adaptive logics, and finally the discrete fuzzy input-output linearization (L.E.S.D.F).

For each scheme, simulation results are given to highlight performances of each one.

Keywords:

Absorption packed column, distributed parameters model, PI regulation, fuzzy control, neural networks, discrete fuzzy input-output linearization.

Résumé :

L'objectif de ce travail porte sur l'application de différentes stratégies de commande floues à une colonne d'absorption pilote à garnissage utilisée pour retirer le CO_2 d'un mélange gazeux (air+ CO_2) par absorption grâce à un liquide de lavage (Eau+MonoEthanolAmine). La modélisation de notre système à l'aide d'un bilan de matière permet d'obtenir un système non linéaire aux paramètres répartis.

Afin d'améliorer les résultats obtenus avec une régulation PI classique, nous avons appliqué à notre système trois techniques de commande se basant sur la logique floue, qui sont : l'approche floue classique, neuro-floue adaptative et la linéarisation entrée-sortie discrète floue (L.E.S.D.F).

Pour chaque structure de commande, des résultats de simulation sont présentés pour montrer ses performances.

Mots clés :

Colonne d'absorption à garnissage, modèle à paramètres répartis, régulation PI, commande floue, réseaux de neurones, L.E.S.D.F.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon cher Père

A ma très chère Mère

*A mon frère **Abdelfettah** et à mes deux sœurs **Amel et Fella***

*Ainsi qu'à la mémoire de mes **Grands Parents Maternels***

*Et à la mémoire de ma tante **Dalila***

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire de Commande des Processus (L.C.P) du département du Génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de Monsieur Rachid Illoul, chargé de cours à l'ENP que je tiens à remercier du fond du cœur pour la proposition du sujet, pour sa gentillesse, sa disponibilité et pour ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Ammar Selatnia pour son aide et ses conseils.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à tous les enseignants du département du Génie Electrique et particulièrement ceux de l'Automatique pour leur contribution à ma formation et leurs encouragements.

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I

Modélisation et Simulation de la Colonne d’Absorption

I.1. Introduction.....	6
I.2. Description et Fonctionnement de la colonne d’absorption.....	6
I.3. Transfert de matière avec réaction chimique.....	9
<i>I.3.1. Principe.....</i>	9
<i>I.3.2. Bilan de matière en phase liquide dans le sens transversal.....</i>	10
<i>I.3.3. Expression de C_{AL} et des densités de flux en phase liquide.....</i>	11
I.3.3.1. Cas d’une réaction de pseudo premier ordre.....	11
I.3.3.2. Cas d’une réaction du deuxième ordre.....	15
<i>I.3.4. Expression de Kishinevskii.....</i>	18
<i>I.3.5. Bilan de matière dans le sens longitudinal.....</i>	19
I. 4. Simulation dynamique de la colonne d’absorption.....	24
<i>I.4.1. Equations aux dérivées partielles EDP.....</i>	24
<i>I.4.2. Description de la fonction pdepe.....</i>	24
<i>I.4.3. Validation du modèle mathématique développé.....</i>	26
<i>I.4.4. Résultats de simulation en régime dynamique.....</i>	27
Simulation en boucle ouverte	
<i>Premier point de fonctionnement.....</i>	27
<i>Second point de fonctionnement</i>	30
Simulation de la régulation PI	
<i>Premier point de fonctionnement.....</i>	32
<i>Second point de fonctionnement.....</i>	36
Interprétation des résultats	
<i>En boucle ouverte.....</i>	40
<i>En boucle fermée.....</i>	40
I.5. Conclusion.....	41

CHAPITRE II

Logique floue et Neuro-Floue

II.1. Introduction.....	42
II. 2. Bref historique de la logique floue.....	43
<i>II.2.1. Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle.....</i>	43
II.3. Principes de la logique floue.....	44
<i>II.3.1. Variables linguistiques.....</i>	44
<i>II.3.2. Ensembles flous.....</i>	45
Ensemble net.....	45
Ensemble flou.....	45
<i>II.3.3. Fonctions d'appartenance.....</i>	46
<i>II.3.4. Opérations sur les ensembles flous.....</i>	47
<i>II.3.5. Implication floue.....</i>	48
II.4. Structure d'un système flou.....	48
<i>II.4.1. Types de régulateurs flous.....</i>	50
<i>II.4.2. Synthèse des régulateurs flous.....</i>	50
II.5. Les réseaux de neurones.....	51
<i>II.5.1. Définition.....</i>	51
<i>II.5.2. Apprentissage des réseaux de neurones.....</i>	52
II. 6. Contrôleur neuro-flou.....	52
<i>II.6.1. Apprentissage du contrôleur neuro-flou.....</i>	54
II.7. Propriétés structurelles des systèmes flous.....	55
<i>II.7.1. Représentation entrée-sortie floue.....</i>	55
<i>II.7.2. Objectif de commande.....</i>	56
II.7.2.1. Synthèse de la loi de commande par inversion du système.....	57
II.7.2.2. Identification du modèle flou.....	57
<i>Remarque sur les fonctions triangulaires.....</i>	58
<i>II.7.3. Propriétés du système flou à deux entrées.....</i>	58
Exemple illustratif.....	61
<i>II.7.4. Décomposition du système flou global en sous systèmes élémentaire.....</i>	63
<i>II.7.5. Systèmes flous affines en une entrée.....</i>	65
II.8. Commande floue discrète.....	66
<i>II.8.1. Linéarisation entrée-sortie Discrète Floue (L.E.S.D.F).....</i>	67

II.9. Conclusion.....	68
-----------------------	----

CHAPITRE III

Applications et Résultats de Simulations

III.1. Introduction.....	70
III.2. Présentation des stratégies de commande.....	70
<i>III.2.1. Régulateur flou.....</i>	<i>70</i>
<i>III.2.2 Régulateur neuro-flou adaptatif.....</i>	<i>71</i>
<i>III.2.3. Linéarisation entrée-sortie Discrète Floue (L.E.S.D.F).....</i>	<i>72</i>
III.3. Résultats de la simulation.....	74
1. <i>Régulateur flou.....</i>	<i>74</i>
1.1. Premier point de fonctionnement.....	74
1.2. Second point de fonctionnement.....	78
2. <i>Régulateur neuro-flou adaptatif.....</i>	<i>82</i>
2.1. Premier point de fonctionnement.....	82
2.2. Second point de fonctionnement.....	86
3. <i>Commande L.E.S.D.F.....</i>	<i>90</i>
3.1. Premier point de fonctionnement.....	90
3.2. Second point de fonctionnement.....	94
III.4. Interprétation des résultats.....	97
1. <i>Régulateur flou.....</i>	<i>97</i>
2. <i>Régulateur neuro flou adaptatif.....</i>	<i>97</i>
3. <i>Commande L.E.S.D.F.....</i>	<i>98</i>
III.5. Comparaison entre les différentes techniques de commande.....	98
1. <i>Régulateur PI et régulateur flou.....</i>	<i>98</i>
2. <i>Régulateur flou classique et la L.E.S.D.F.....</i>	<i>99</i>
III.6. Conclusion.....	99
CONCLUSION GENERALE.....	101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. Colonne d'absorption

Figure I.2. Schéma de la colonne d'absorption

Figure I.3. Profils des concentrations pour le transfert de matière avec réaction chimique dans le sens transversal

Figure I.4. Bilan de matière sur une tranche élémentaire (dz) dans le sens longitudinal

Simulation en boucle ouverte :

Premier point de fonctionnement

Figure I.5. Concentration du CO_2 et de la MEA en sortie pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

Figure I.6. Echelon de perturbation de + 20% sur C_{Be}

Figure I.7. Echelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

Figure I.8. Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

Figure I.9. Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

Second point de fonctionnement

Figure I.10. Concentration du CO_2 et de MEA en sortie pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

Figure I.11. Echelon de perturbation de + 20% sur C_{Be}

Figure I.12. Echelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

Figure I.13. Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

Figure I.14. Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

Simulation de la régulation PI

Premier point de fonctionnement

Figure I.15. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure I.16. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure I.17. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure I.18. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure I.19. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure I.20. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure I.21. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

Second point de fonctionnement

Figure I.22. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure I.23. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure I.24. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure I.25. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure I.26. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure I.27. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure I.28. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

CHAPITRE II

Figure II.1. Fonction d'appartenance pour T (erreur)

Figure II.2. Fonction d'appartenance

Figure II.3. Formes des fonctions d'appartenance usuelles

Figure II.4. Schéma de commande par logique floue

Figure II.5. Neurone Formel

Figure II.6. Modèle formel d'un neurone

Figure II.7. Structure du contrôleur neuro-flou

Figure II.8. Inversion en boucle ouverte

Figure II.9. Intervalles flous

Figure II.10. Maille floue élémentaire

Figure II.11. Mailles floues élémentaires du système

CHAPITRE III

Figure III.1. Schéma de la stratégie de commande floue

Figure III.2. Schéma de la stratégie de commande neuro-floue

Régulateur flou

Premier point de fonctionnement

Figure III.3. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.4. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.5. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.6. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.7. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.8. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.9. Influence de la taille de la base des règles sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

Figure III.10. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

Second point de fonctionnement

Figure III.11. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.12. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.13. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.14. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.15. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.16. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.17. Influence de la taille de la base des règles sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

Figure III.18. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

Régulateur neuro-flou adaptatif

Premier point de fonctionnement

Figure III.19. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.20. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.21. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.22. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.23. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.24. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.25. Influence du choix de l'initialisation des poids sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

Figure III.26. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

Second point de fonctionnement

Figure III.27. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.28. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.29. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.30. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.31. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.32. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.33. Influence du choix de l'initialisation des poids sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

Figure III.34. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

Commande L.E.S.D.F

Premier point de fonctionnement

Figure III.35. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.36. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.37. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.38. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.39. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.40. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.41. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

Second point de fonctionnement

Figure III.42. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

Figure III.43. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

Figure III.44. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

Figure III.45. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

Figure III.46. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

Figure III.47. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

Figure III.48. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1.1. Paramètres du modèle pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $T=40^{\circ}\text{C}$

Tableau I.2. Valeurs des concentrations expérimentales et théoriques de la MEA et du CO_2 à la sortie de la colonne

CHAPITRE II

Tableau II.1. Intervalles flous

Tableau II.2. Base de règles du système flou

Tableau II.3. Sortie sur chaque maille floue élémentaire

Introduction Générale

Les risques de changement climatique ont fait l'objet de nombreux débats au cours de ces dernières années. Actuellement, la plupart des experts estiment que ces risques sont réels et directement reliés aux émissions de gaz à effet de serre, et tout particulièrement de CO₂.

Les émissions de CO₂ ont fortement augmenté au cours des récentes décennies. Elles entraînent une augmentation de la teneur de ce gaz dans l'atmosphère. Cette augmentation de la concentration serait responsable de la tendance au réchauffement climatique déjà observée, et pourrait avoir dans l'avenir des conséquences beaucoup plus dramatiques, si aucune mesure n'est prise [IFP03].

A côté des indispensables mesures de réduction des consommations d'énergie et de développement des énergies renouvelables, la capture et le stockage géologique du CO₂ s'avère une option incontournable tant que les combustibles fossiles seront exploités.

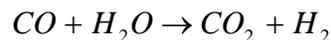
La possibilité de capturer et de stocker durablement le CO₂ dans des formations géologiques apparaît comme une voie prometteuse sur le moyen et le long terme. Elle comprend quatre principales étapes : la capture, la compression, le transport et le stockage du CO₂ [WEC04].

Les techniques de capture du CO₂ appartiennent à trois catégories générales : la séparation précombustion; l'oxycombustion ; et la séparation postcombustion.

Le principe de la capture en *précombustion* se base sur les quatre étapes suivantes:

La production du gaz de synthèse : le reformage à la vapeur ou oxydation partielle à l'oxygène des hydrocarbures produit un gaz de synthèse composé principalement de CO et de H₂. Cette étape correspond pour le charbon à une gazéification;

La production d'hydrogène : Transformation du CO en CO₂ et de la vapeur en hydrogène par la réaction de conversion de shift :



Capture : le CO₂ est séparé de l'hydrogène;

Combustion : l'hydrogène pur est utilisé comme combustible.

L'*oxycombustion* : quand un carburant fossile (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) est brûlé dans l'air, la fraction du CO₂ dans le gaz produit est de 3-15%, en fonction du contenu en élément carbone du carburant et de la quantité d'air supplémentaire nécessaire pour le procédé de combustion. La séparation de CO₂ du reste des gaz de combustion (surtout du N₂) par des moyens chimiques ou physiques est chère en termes de capital et d'énergie. Une alternative est de brûler le carburant avec de l'oxygène pur ou enrichi, ainsi le gaz de combustion contiendra surtout du CO₂ et de l'eau. Le procédé de séparation ne sera plus le même dans ce cas : on doit séparer l'oxygène et l'azote de l'air. L'air est alors séparé en oxygène liquide, azote gazeux, argon et autres ingrédients mineurs de l'air (ces sont des produits dérivés commerciaux).

La postcombustion : cette technique se base sur l'absorption chimique du CO_2 par un solvant dans une colonne d'absorption où le gaz à traiter et la solution de solvant circulent à contre-courant. C'est le procédé de capture le plus répandu dans le secteur pétrolier lors du traitement des gaz acides (contenant de l' H_2S et/ou du CO_2) et dans l'industrie.

Le principe du processus est le suivant : du gaz chargé de CO_2 circule dans la colonne du bas vers le haut (ascendant). Une solution aqueuse de liquide de lavage circule par gravité sur le garnissage utilisé pour améliorer la surface de contact entre phases. Lors du contact entre phase liquide et gazeuse, le CO_2 passe de la phase gazeuse vers la phase liquide ; cette diffusion est accélérée par réaction chimique du CO_2 avec le liquide de lavage dans la phase liquide. Le liquide de lavage est ainsi considéré comme un absorbant. Ce liquide va se charger en gaz carbonique et nous aurons donc en tête de la colonne le gaz épuré. Le liquide chargé en CO_2 qui sort en bas de la colonne sera chauffé vers $100\text{-}120\text{ }^\circ\text{C}$; la réaction qui avait lieu à basse température :



sera ainsi inversée, on régénérera le solvant qui sera réinjecté dans la colonne et le CO_2 pur se dégageant de la solution sera facilement récupéré.

Une large variété d'alkanolamine est disponible dans l'industrie, les plus connus sont le monoéthanolamine (MEA), le diéthanolamine (DEA), le di-2- propanolamine (DIPA), et le methyldiéthanolamine (MDEA). A noter que les amines primaires et secondaires comme le MEA et la DEA sont très réactives et se distinguent par un taux d'absorption de CO_2 très élevé ce qui explique le fait que leur utilisation soit la plus répandue [IDE06] ; dans notre étude nous utiliserons le MEA.

Modélisation et Commande des Colonnes d'Absorption

La nature complexe de ces procédés les rend souvent difficiles à modéliser et à commander. Les non linéarités compliquent le développement d'un modèle ou la synthèse d'un régulateur qui soit satisfaisant sur tout le domaine de fonctionnement ; la modélisation des colonnes d'absorption n'est pas un sujet nouveau. Les modèles de ce type de réacteur sont bien connus et disponibles dans les ouvrages de génie chimique. Son utilisation à des fins de commande est par contre beaucoup moins fréquente compte tenu de la complexité de ce type de modèle. En effet, le modèle d'une colonne d'absorption en transitoire est composé d'équations aux dérivées partielles non linéaires. Ce type de modèle est appelé modèle à paramètres répartis car les variables du système ne sont plus seulement fonction du temps mais également de l'espace.

Le modèle non linéaire à paramètres répartis d'une colonne d'absorption a l'avantage d'être valide pour tous les points de fonctionnement dans la mesure où l'ensemble des variables opératoires sont incluses dans le modèle. De plus, ce type de modèle permet de tenir compte directement de l'information disponible sur le procédé. En effet, les paramètres hydrodynamiques et la cinétique de réaction apparaissent explicitement dans le modèle.

L'analyse des travaux antérieurs montre que beaucoup de développements ont été accomplis dans la commande des systèmes à paramètres répartis.

Différentes approches ont été considérées pour commander des systèmes à paramètres distribués. Ray [Ray81] propose de scinder ces approches en deux grandes catégories: les stratégies de pré-approximation et les stratégies de post-approximation. Les approches par pré-approximation utilisent une approximation préalable des équations aux dérivées partielles (EDPs) en équations différentielles ordinaires (EDOs). L'algorithme de commande est donc conçu en utilisant cette approximation. Dans les stratégies de post-approximation la conception de la loi de commande est faite directement à partir du modèle à paramètres répartis [SKE90].

Les stratégies de pré-approximation se distinguent par le type d'approximation utilisé. En effet, des techniques analytiques ou numériques doivent être utilisées pour permettre la transformation des EDPs en un nombre suffisamment restreint d'EDOs pour que l'approximation du modèle permette la conception de loi de commande. Parmi les techniques numériques, notons la technique de collocation orthogonale [VIL78] qui permet d'obtenir un nombre restreint d'équations. Cette dernière méthode a été appliquée avec succès par Olafadehan [OLA04] pour la résolution d'équations aux dérivées partielles décrivant l'adsorption dans une colonne à garnissage.

Du point de vue commande, les techniques de commande pour les systèmes non linéaires reposait classiquement sur la théorie de l'automatique linéaire et la linéarisation de la dynamique du système (approximation de premier ordre) autour d'un point de fonctionnement ce qui permet d'utiliser les outils de la commande linéaire pour la synthèse d'une loi de commande assurant les performances recherchées [SLO91]. Grâce à sa facilité d'implantation et de mise en oeuvre, cette approche a remporté un grand succès auprès des industriels mais l'utilisation de modèles ou de régulateurs linéaires est justifiée et efficace seulement lorsque le procédé reste très près de son point de fonctionnement en toute circonstance [VEN02]. La nécessité d'atteindre de hautes performances dans des domaines de fonctionnement relativement larges, a imposé la prise en compte de la dynamique globale non linéaire des processus pour la synthèse de la commande. [LAB05].

Intérêt de la Logique Floue dans la Modélisation et la Commande

Comme il est souvent difficile, voire impossible d'avoir un modèle de connaissance pour les systèmes complexes, on peut alors utiliser un modèle de représentation. L'une des formes les plus répandues des modèles de représentation est la logique floue où les relations entre les entrées, les sorties et les états sont exprimés par des règles de type « Si-Alors ».

Depuis l'introduction du concept de la logique floue par L. Zadeh et son application à une chaudière par Mandani en 1974, plusieurs applications ont été faites pour les processus industriels. Le souci d'améliorer les performances des processus industriels et de réduire les coûts est une raison déterminante pour l'introduction de nouvelles stratégies de commande.

Le modèle d'un procédé, même relativement complexe, n'est jamais parfait (dynamiques négligées, incertitudes paramétriques...), la technique de commande floue est souvent présentée comme une technique robuste capable de compenser quasi naturellement les incertitudes et/ou le manque de connaissances précises quant au processus à commander. Cependant, il est parfois difficile de construire la base des règles de commande pour certains systèmes, ou l'on peut ressentir le besoin d'ajuster les paramètres du contrôleur, dans le cas de systèmes à dynamiques variables par exemple [LAB05]. Pour remédier à cela, et permettre aux contrôleurs flous un

apprentissage à partir de données numériques, les chercheurs ont combiné la logique floue avec les réseaux de neurones. On combine ainsi les propriétés de traitement de l'imprécis ou l'incertain des systèmes flous aux propriétés d'apprentissage des réseaux de neurones qui introduisent des capacités d'autoréglage et d'adaptabilité dans les systèmes flous.

Une autre approche a suscité beaucoup d'intérêts dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires, c'est la linéarisation entrée-sortie. L'idée de base est de transformer une classe de systèmes non linéaires en systèmes linéaires par la technique de la L.E.S. Dans ce cas, le système linéaire transformé peut être commandé par des méthodes classiques de l'automatique linéaire.

La linéarisation entrée-sortie a suscité beaucoup d'intérêts dans le domaine continu (systèmes non linéaires continus), comme en témoigne le nombre de travaux publiés dans la littérature [ISI85] [SAS89] [SLO91] [MAR95]. Cependant, dans le cadre discret, (systèmes non linéaires discrets), on dispose de très peu de recherches sur le sujet. Cela est sans doute dû au fait que la L.E.S. est particulièrement bien adaptée aux systèmes affines en commande, hypothèse classiquement acceptée dans le domaine continu mais discutable pour les systèmes discrets [BOU00].

La technique dite de linéarisation entrée-sortie discrète floue (*L.E.S.D.F*) est une *L.E.S.D* classique qui emploie un modèle flou pour représenter la dynamique d'un système non linéaire discret. Dans [VAN95], une loi de commande floue a été synthétisée pour une classe limitée de systèmes non linéaires sous la forme $x(k+1) = f(x(k)) + u(k)$, où f est une fonction non linéaire inconnue. Jagannathan [JAG98] propose une loi de commande linéarisante pour une classe de systèmes un peu plus large qui peut s'exprimer sous la forme $x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k)$ (système discret affine en commande), où f et g sont deux fonctions non linéaires inconnues. Boukezzoula dans [BOU00] a développé le concept de la L.E.S.D.F en utilisant des fonctions d'appartenance triangulaire, ceci permet d'approximer un modèle non linéaire discrets par un système flou affine en la commande. Dans ce cas, le système linéaire transformé peut être commandé par des méthodes courantes de l'automatique (placement de pôles discrets, synthèse quadratique, ... etc.).

Travaux sur la Colonne d'Absorption

Peu d'études ont été menées sur la modélisation et la commande des colonnes d'absorptions. En effet, Van Der Weg ([VAN76]) a présenté des travaux sur la modélisation en supposant que la concentration en absorbant était suffisamment élevée pour la supposer constante tout le long de la colonne. Crosby dans [CRO76] a étudié la performance d'un contrôleur d'état sur une colonne à garnissage. Roffel dans [ROF76] a développé un contrôleur de sortie sous optimal avec contrainte inégalité sur l'état. Darwish and Fantin dans [DAR80] ont utilisé une commande décentralisée avec placement de pôles. Petrovsky dans [PET80] a développé un régulateur multivariable PI. Najim dans [NAJ91] a développé un régulateur auto-ajustable dans le cas de l'absorption de CO_2 par une solution de diéthanolamine. Il a ultérieurement repris le problème avec une commande prédictive dans [NAJ95]. Finalement, Illoul, Selatnia et Boulrouah [ILL02] appliquent une commande prédictive généralisée linéaire ainsi qu'une commande neuro-floue [ILL04] à un premier modèle d'une colonne d'absorption. Haddouche [HAD06] a appliqué une commande basée sur les réseaux de neurones à la colonne d'absorption.

Objectif et organisation du mémoire

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur l'utilisation des techniques de la logique floue, neuro-floue adaptative et la L.E.S.D.F. pour la commande d'une colonne d'absorption pilote.

La thèse est organisée en trois chapitres. Le premier est consacré à la modélisation du comportement dynamique de notre système à partir des principes fondamentaux concernant le transfert de matière et les équations du bilan de matière. Pour pouvoir valider notre modèle, une comparaison entre les résultats expérimentaux ([SED04]) et ceux obtenus par simulation sera effectuée. Nous présenterons également les résultats de simulation en boucle ouverte. La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la régulation PI, et ce dans le but de comparer les résultats donnés par une approche classique de commande avec ceux donnés par des approches avancées telle que la logique floue.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la logique floue. Nous exposerons au début les principales notions de logique floue et l'application de ces notions à la représentation des expressions linguistiques ainsi que l'application de la logique floue à la commande. Après une brève introduction aux réseaux de neurones, nous nous intéresserons à la combinaison logique floue- réseaux de neurones. Nous présenterons la stratégie de commande neuro-floue utilisée dans notre application. Pour terminer, nous aborderons quelques propriétés structurelles des systèmes flous (Représentation entrées/sorties floue, décomposition du système flou global en sous systèmes élémentaires ainsi que les systèmes flous affines en une entrée,...) et cela afin d'introduire la linéarisation entrée-sortie discrète floue qui sera développée à la fin du chapitre.

Dans le troisième chapitre, les résultats de simulation obtenus par l'application des stratégies de commande floue, neuro-floue, et L.E.S.D.F. exposées dans le chapitre II seront présentés et cela pour deux différents points de fonctionnement de la colonne d'absorption pilote. Il sera effectué pour chacune des commandes plusieurs essais correspondant à différents niveaux de perturbations et cela afin d'étudier la robustesse ainsi que les performances des régulateurs utilisés. Cette étude sera complétée par une comparaison entre les différentes stratégies de commande abordées dans ce mémoire.

Chapitre I :

Modélisation et Simulation de la Colonne d’Absorption

Nomenclature du chapitre I

A, B	CO ₂ , MEA
R	-CH ₂ -CH ₂ -OH
a	Aire interfaciale par unité de volume du garnissage ($m^2.m^{-3}$)
C_{Ag}, C_{AL}	Concentration du CO ₂ dans la phase gazeuse et dans la phase liquide (mol/m^3)
$C_{BL}(x)$	Concentration du composé B dans la phase liquide (mol/m^3)
C_{ge}, C_{Be}	Concentration du CO ₂ dans la phase gazeuse et de la MEA dans la phase liquide à l'entrée de la colonne ($mol.m^{-3}$).
C_{gs}, C_{Bs}	Concentration du CO ₂ dans la phase gazeuse et de la MEA dans la phase liquide à la sortie de la colonne ($mol.m^{-3}$).
C_{Bli}	Concentration de la MEA dans la phase liquide à l'interface gaz-liquide ($mol.m^{-3}$)
C_{Ali}, C_{Agi}	Concentration du CO ₂ dans la phase liquide et dans la phase gazeuse à l'interface gaz-liquide ($mol.m^{-3}$).
G, L	Débit volumique de la phase gazeuse et liquide ($m^{-3}.s^{-1}$)
U_g, U_l	Vitesse d'écoulement du gaz et du liquide ($m.s^{-1}$)
F_A	Le flux du composé CO ₂ transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide ($mol.m^{-3}.s^{-1}$)
N_A	Flux de matière du composé A transféré vers la phase liquide dans le cas du transfert de matière avec réaction chimique ($mol/m^2.s$)
N'_A	Flux sans réaction chimique ($mol/m^2.s$)
k_L	Coefficient de transfert de matière dans la phase liquide (m/s)
k	Constante de vitesse de réaction ($m^3/mol.s$)
k'	Constante de la réaction de pseudo premier ordre
k_A	Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide, pour le cas de transfert de matière sans réaction chimique (m/s)
k_{AG}	Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase gazeuse (m/s)

k_{AL}	Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide (m/s)
D_{Al}	Coefficient de diffusion du CO ₂ dans la phase liquide ($m^2.s^{-1}$)
D_{BL}	Coefficient de diffusion du composé B dans la phase liquide (m^2/s)
r_A	Vitesse de la réaction ($mol / m^3.s$)
δ_L	Épaisseur du film coté liquide (m)
Ha	Nombre adimensionnel appelé nombre de Hatta
J	Nombre adimensionnel
E	Facteur d'accélération
S	Section de la colonne (m^2)
dz	Hauteur d'une tranche de la colonne d'absorption
ζ_L	Rétention liquide
m	Pente de la droite d'équilibre physique entre phases
ν_A	Coefficient stœchiométrique du composé A
ν_B	Coefficient stœchiométrique du composé B
ν_P	Coefficient stœchiométrique du composé P

I.1. Introduction

Les processus physico-chimiques sont très répandus en pratique, surtout les colonnes d'absorption du CO_2 par des solutions aqueuses de monoéthanolamine (MEA) qui sont largement utilisées comme unités de séparation dans l'industrie chimique. Les principales utilisations sont dans l'industrie de fabrication de l'ammoniac et dans les unités de traitement du gaz naturel du fait de leur simplicité de conception et d'utilisation.

Pour la commande de ces processus, on a recours dans la majeure partie des cas à un modèle de conduite (de type boîte noire), mais pour améliorer les performances et aboutir à un modèle mathématique du fonctionnement de la colonne nous sommes amenés à utiliser un modèle de connaissance (de type génie chimique) qui permet d'établir un modèle du procédé en se basant sur les lois fondamentales de la physique et de la chimie, telles que la conservation de masse, les équilibres entre phases, les lois de transfert,...[PIN84], [VAN76]

Dans ce chapitre, nous développerons en premier lieu un modèle mathématique décrivant le fonctionnement en régime dynamique de la colonne d'absorption à garnissage opérant à contre courant. Ce dernier est élaboré à partir des bilans de matière dans chaque phase gazeuse et liquide. On obtient ainsi un système aux paramètres répartis et fortement non linéaire. Puis, nous simulerons le comportement de ce système en boucle ouverte ainsi qu'en boucle fermée avec un régulateur Proportionnel Intégral, et ceci pour différentes valeurs des perturbations possibles ainsi que pour un changement de consigne.

La simulation de notre colonne d'absorption est effectuée à l'aide du logiciel MATLAB 6.5 et plus particulièrement de la routine pdepe qui permet de simuler les équations aux dérivées partielles unidimensionnelles.

I.2. Description et Fonctionnement de la colonne d'absorption

La colonne d'absorption utilisée dans notre étude est une colonne en garnissage en verre, mesurant 1,26 m de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur. La colonne possède deux tronçons superposés dont la hauteur est de 63 cm chacun et dont le but est de recentrer le liquide et de permettre la prise d'échantillons liquides et gazeux, chaque tronçon contient des grains de garnissage. Le choix du garnissage, qui est un élément essentiel, est dicté par la surface de contact offerte entre le gaz et le liquide utilisé, le calcul des pertes de charge et son prix. Les garnissages peuvent être de formes variées (anneaux, selles...), de matériaux différents (céramique, verre, métal...) et être rangés ou disposés en vrac. La colonne fonctionne en circuit ouvert ou fermé. Dans notre étude, le garnissage est disposé en vrac et est du type anneaux de Raschig, de dimension caractéristique de 10mm destiné à améliorer la surface de contact entre phases. La pression et la température de travail sont respectivement de 1,2 bars et de 25°C. L'amplitude des perturbations en composition du CO_2 dans le mélange à traiter est de l'ordre de 10 à 20%. Cette colonne est utilisée pour réduire la concentration du CO_2 à une valeur désirée [SED04].

La circulation du liquide à travers toute la colonne est assurée à l'aide d'une pompe qui refoule des débits compris entre 5 et environ 260 l/h. Quant à l'échantillonnage, il est assuré grâce au robinet de prélèvement placé en aval de la colonne d'absorption. Les débits des différents fluides sont contrôlés par des débitmètres, qui ont été préalablement étalonnés.

En ce qui concerne l'alimentation de l'installation en CO_2 et en air, le dispositif est équipé d'un compresseur qui assure l'alimentation en air, quant au CO_2 , il provient d'une bouteille conçue spécialement pour les usages industriels [SED04].

Le principe du processus est le suivant : Du gaz chargé de CO_2 circule dans la colonne du bas vers le haut (ascendant). Une solution aqueuse de liquide de lavage, ici la MEA circule à contre-courant, par gravité sur le garnissage. Lors du contact entre phase liquide et gazeuse sur la surface des anneaux de Raschig, le CO_2 passe de la phase gazeuse vers la phase liquide ; cette diffusion est accélérée par réaction chimique du CO_2 avec la MEA dans la phase liquide. La MEA est ainsi considéré comme un absorbant. Ce liquide va se charger en gaz carbonique et nous aurons donc en tête de la colonne le gaz épuré. Par mesure d'économie, la MEA est régénérée (épurée du CO_2 quelle contient) par élévation de température (110°C) puis recyclée dans le pilote. Le débit de MEA et la concentration du CO_2 dans le mélange gazeux sont respectivement sélectionnés comme variables de commande et de sortie [SED04].



Figure I.1. Colonne d'absorption

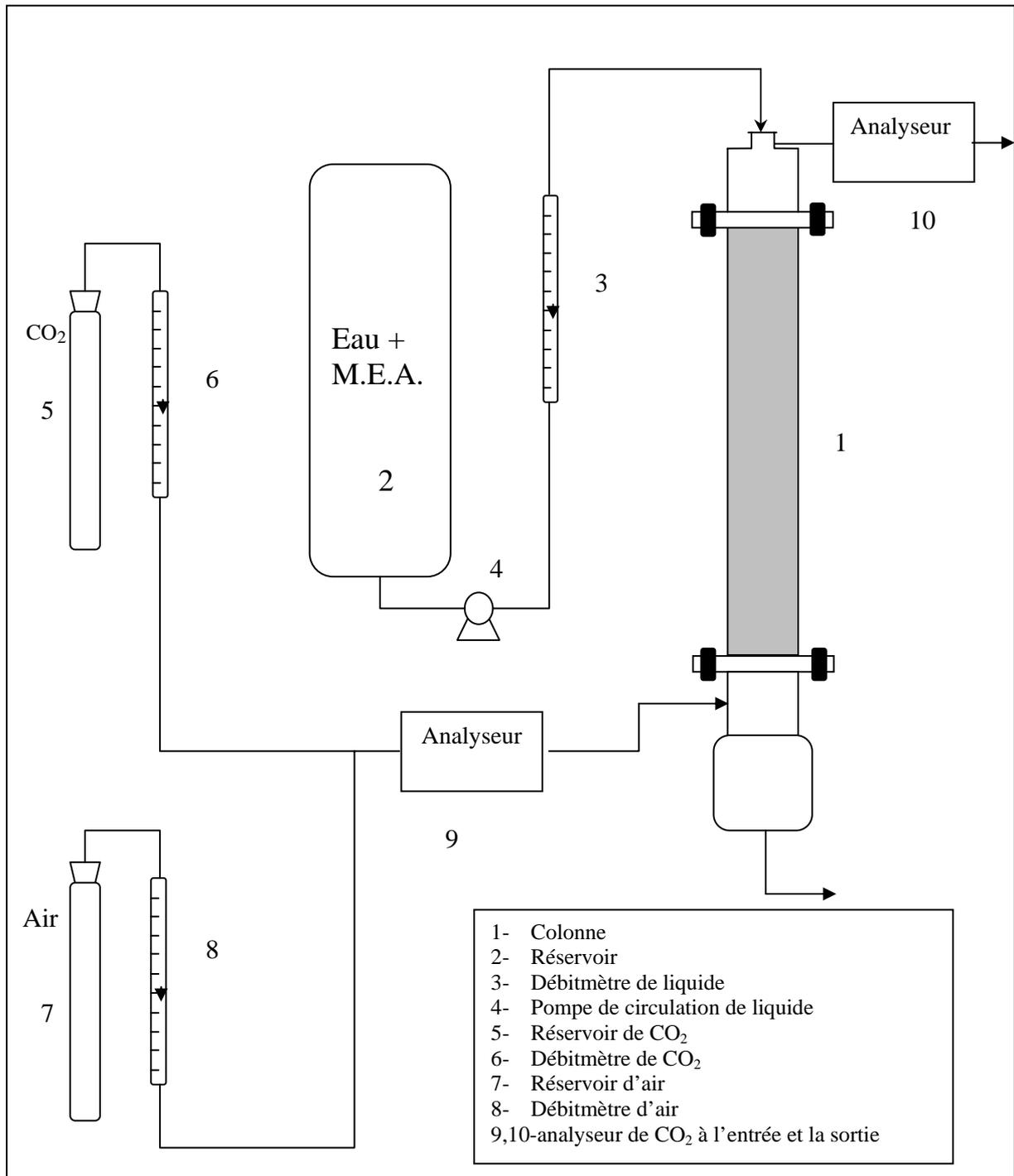


Figure I.2. Schéma de la colonne d'absorption

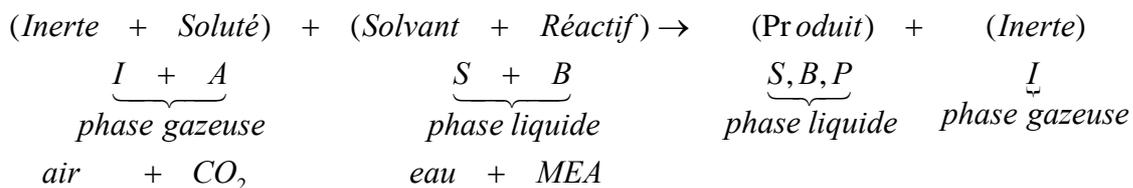
I.3. Transfert de matière avec réaction chimique

I.3.1. Principe

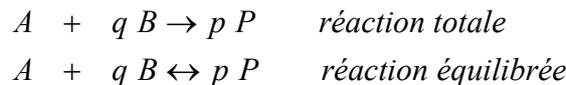
L'absorption d'un gaz accompagnée d'une réaction chimique dans la phase liquide permettra d'améliorer l'efficacité de séparation (par exemple l'absorption du CO₂ dans une solution aqueuse de soude, amine ...etc.), et la sélectivité de séparation (par exemple l'absorption du CO₂ et H₂S dans des solutions d'éthanolamine). [SED04]

Une absorption avec réaction chimique va accélérer le transfert du soluté de la phase gazeuse vers la phase liquide.

La réaction à étudier étant la suivante :



Au cours de laquelle le soluté (A) réagit avec le réactif (B) en solution pour donner le produit (P) d'après les réactions suivantes :



Cette réaction a un double effet :

- L'augmentation de la capacité d'absorption du liquide puisque le réactif fait disparaître le soluté absorbé et la force motrice du transfert est donc accrue.
- L'accroissement de la vitesse avec laquelle le soluté franchit l'interface pour passer dans le liquide, le coefficient de transfert de matière augmente par conséquent.

Ce dernier effet est pris en compte dans les expressions du flux spécifique d'absorption en multipliant le coefficient de transfert de matière en phase liquide sans réaction chimique par un facteur appelé facteur d'accélération, noté **E**.

Le flux spécifique d'absorption avec réaction chimique s'écrira donc :

$$Fa = N_A \cdot a = E k_L \cdot a \cdot (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Fa : Le flux volumique d'absorption du composé A ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)

N_A : Flux surfacique du composé A, pour les cas du transfert de matière avec réaction chimique ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

a : Aire interfaciale (m^2/m^3)

C_{ALi} : Concentration du composé A à l'interface coté liquide (mol/m^3)

C_{AL} : Concentration du composé A dans la phase liquide (mol / m^3)

k_L : Coefficient de transfert de matière dans la phase liquide (m/s)

Comme toute opération de transfert de matière, l'absorption avec réaction chimique peut être décomposée en plusieurs étapes [SED04]:

- Transfert de A de la phase gazeuse vers l'interface gaz/liquide ;
- Transfert de A de l'interface vers la phase liquide ;
- Transfert du réactif dans la phase liquide vers le site réactionnel ;
- Réaction entre A et B ;

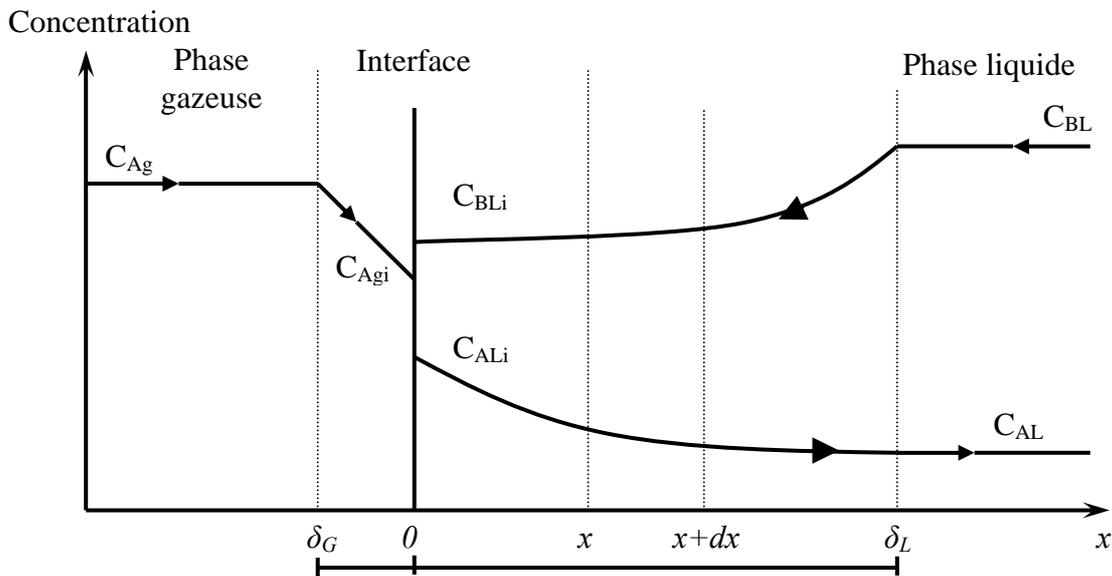


Figure I.3. Profils des concentrations pour le transfert de matière avec réaction chimique dans le sens transversal

I.3.2. Bilan de matière en phase liquide dans le sens transversal

Le bilan de matière pour le composé (A) pour une tranche fine d'épaisseur dx dans le sens transversal, et pour une section unitaire d'aire interfaciale, en appliquant la loi de FICK relative à la diffusion moléculaire dans les milieux quasi-immobile, s'écrit : [ABE02]

Flux de A entrant + Quantité de A apparaissant = Flux de A sortant
à l'abscisse x ou disparaissant par à l'abscisse $x + dx$
unité de temps

$$-D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x + \nu_A r_A dx = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} \quad (I.2)$$

ν_A : Coefficient stœchiométrique du composé A.

Remarque [DOU06]

FICK a établi que le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration. Cette loi est dérivée de la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur.

Le flux est donné par la loi suivante :

$$J = -D.S.\text{grad } C$$

C est la concentration de l'espèce diffusante.

D est le coefficient de diffusion en m^2/s , $D = D_{AL}$.

S section en m^2 .

grad C est le gradient de la concentration, le signe “-” est ajouté car le flux de diffusion doit être positif et que dC/dx est négatif.

dx étant très petit, nous avons donc:

$$\frac{\left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} - \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x}{dx} = \frac{d \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]}{dx} = \frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \quad (I.3)$$

L'égalité (I.2) devient alors :

$$D_{AL} \left[\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] + v_A r_A = 0 \quad (I.4)$$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{cases} x = 0 & ; & C_{AL}(0) = C_{ALi} \\ x = \delta_L & ; & C_{AL}(\delta_L) = C_{AL} \end{cases} \quad (I.5)$$

L'intégration de l'équation (I.4) est plus ou moins complexe suivant la forme de l'équation de vitesse.

I.3.3. Expression de C_{AL} et des densités de flux en phase liquide**I.3.3.1. Cas d'une réaction de pseudo premier ordre ($C_{BL}(x)$ est constant)**

Soit la réaction d'ordre 1 par rapport à chacun des deux réactifs : A et B :



La vitesse de réaction peut s'écrire de la manière suivante : [BOU01]

$$r_A = k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = k' C_{AL}(x) \quad (I.6)$$

Avec $k' = kC_{BL}(x)$ en supposant $C_{BL}(x)$ constant

Où :

r_A : Vitesse de la réaction ($mol / m^3.s$)

k : Constante de vitesse de réaction ($m^3 / mol.s$)

k' : Constante de la réaction de pseudo premier ordre ;

$C_{AL}(x)$: Concentration du composé A dans la phase liquide (mol / m^3)

$C_{BL}(x)$: Concentration du composé B dans la phase liquide (mol / m^3)

En considérant que $\mathcal{V}_A = -1$ l'équation (I.4) s'écrira donc comme suit :

$$D_{AL} \left[\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] - k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0 \quad (I.7)$$

En supposant que D_{AL} ; k et C_{BL} sont constantes en phase liquide, c'est-à-dire [ILT 05]:

$C_{BL}(x) = C_{Be} = \text{constante.}$

L'équation (I.7) devient :

$$D_{AL} \left[\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] - k C_{AL}(x) C_{BL} = 0 \quad (I.8)$$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{cases} x = 0 & ; & C_{AL}(0) = C_{ALi} \\ x = \delta_L & ; & C_{AL}(\delta_L) = C_{AL} \end{cases} \quad (I.9)$$

La solution générale de l'équation (I.8) s'écrit :

$$C_{AL}(x) = \beta_1 \exp(\alpha x) + \beta_2 \exp(-\alpha x) \quad (I.10)$$

$$\text{Avec } \alpha = \left[\frac{k C_{BL}}{D_{AL}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Les conditions aux limites permettant de calculer les coefficients β_1 et β_2 :

$$\begin{cases} \beta_1 + \beta_2 = C_{ALi} \\ \beta_1 \exp(\alpha \delta_L) + \beta_2 \exp(-\alpha \delta_L) = C_{AL} \end{cases} \quad (I.11)$$

En résolvant ces deux équations et en remplaçant dans l'équation (I.10), la concentration $C_{AL}(x)$ en phase liquide aura pour expression :

$$C_{AL}(x) = \frac{C_{AL} \operatorname{sh}(\alpha x) + C_{ALi} \operatorname{sh}(\alpha (\delta_L - x))}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (I.12)$$

Et le gradient de $C_{AL}(x)$ s'exprime alors par :

$$\frac{dC_{AL}(x)}{dx} = \frac{\alpha C_{AL} \operatorname{ch}(\alpha x) - \alpha C_{ALi} \operatorname{ch}(\alpha (\delta_L - x))}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (I.13)$$

On en déduit le flux traversant l'interface :

$$[N_A]_{x=0} = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=0} = \frac{D_{AL} \alpha \delta_L \operatorname{ch}(\alpha \delta_L)}{\delta_L \operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \left\{ C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} \right\} \quad (I.14)$$

On peut également exprimer le flux à l'autre extrémité du film, pour $x = \delta_L$:

$$[N_A]_{x=\delta_L} = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=\delta_L} = k_A \frac{\alpha \delta_L}{\operatorname{th}(\alpha \delta_L)} \left\{ \frac{C_{ALi}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} - C_{AL} \right\} \quad (I.15)$$

$$\text{Avec } k_A = \frac{D_{AL}}{\delta_L}$$

Le terme $(\alpha \delta_L)$ représente un nombre adimensionnel, appelé nombre de HATTA (Ha), qui est défini par la formule suivante :

$$\alpha \delta_L = Ha = \frac{\sqrt{k C_{BL} D_{AL}}}{k_A} \quad (I.16)$$

Avec :

D_{AL} : Coefficient de diffusion du composé A dans la phase liquide (m^2/s)

δ_L : Epaisseur du film coté liquide (m)

k_A : Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide, pour le cas de transfert de matière sans réaction chimique (m/s)

On peut alors exprimer la vitesse d'absorption de A, par unité de temps et par unité d'aire interfaciale, en présence de réaction chimique en fonction du nombre de HATTA :

$$[N_A]_{x=0} = k_A \frac{Ha}{th(Ha)} \left\{ C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{ch(Ha)} \right\} \quad (I.17)$$

On sait que le flux sans réaction chimique a pour formule :

$$[N'_A]_{x=0} = k_A (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (I.18)$$

Considérons la grandeur E comme étant le rapport des flux avec et sans réaction chimique, c'est à dire :

$$E = \frac{[N_A]_{x=0}}{[N'_A]_{x=0}} = \frac{Ha}{th(Ha)} \frac{1 - \frac{\lambda}{ch(Ha)}}{1 - \lambda} \quad (I.19)$$

$$\text{Avec } \lambda = \frac{C_{AL}}{C_{ALi}}$$

A partir de cette relation, on peut dire que si $Ha \geq 0.3$ alors $E \neq 1$.

Pour examiner la valeur du flux de A à $x = \delta_L$, puis rapporter sa valeur à celle du flux à $x=0$, on fait le rapport suivant :

$$J = \frac{[N_A]_{x=\delta_L}}{[N_A]_{x=0}} = \frac{1 - \lambda ch(Ha)}{ch(Ha) - \lambda} \quad (I.20)$$

Suivant les valeurs du nombre de HATTA, en utilisant les rapports E et J , trois cas se rencontrent :

1. $Ha < 0.3 \rightarrow$ Réaction lente :

$ch(Ha)$ et J tendent vers 1, il n'y a pratiquement pas de réaction dans le film, celle-ci se déroule essentiellement au cœur de la phase liquide. Dans ce cas :

$$[N_A]_{x=0} \approx [N'_A]_{x=0} = k_A (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (I.21)$$

C'est-à-dire : $E \approx 1$.

2. $0.3 < Ha < 5 \rightarrow$ cas intermédiaire : on utilise l'expression (I.19).

3. $Ha > 5 \rightarrow$ réaction rapide :

La valeur de $\lambda = C_{AL}/C_{ALi}$ sera faible et tend vers zéro car C_{AL} tend vers zéro, la réaction se passera quasi entièrement dans le film liquide. Dans ce cas :

$$J = \frac{1}{ch(Ha)} \quad \text{et} \quad E \approx Ha \quad (I.22)$$

Le flux d'absorption par unité d'aire interfaciale pourra être calculé avec la formule suivante :

$$[N_A]_{x=0} \approx C_{ALi} \cdot k_A \cdot Ha = C_{ALi} \sqrt{k C_{BL} D_{AL}} \quad (I.23)$$

I.3.3.2. Cas d'une réaction du deuxième ordre

Les relations précédentes ont pu être établies en considérant que $C_{BL}(x)$ était constante dans le film, c'est-à-dire que : $C_{BL}(x) \approx C_{BL}$ et donc : $\frac{dC_{BL}(x)}{dx} = 0$ (I.24)

Nous devons envisager le cas où cette hypothèse n'est pas vérifiée. Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir une expression analytique pour $[N'_A]_{x=0}$. On peut toutefois obtenir une solution numérique [SED04].

L'expression (I.4) s'écrit pour les composés A et B de la manière suivante :

$$D_{AL} \left[\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] + \nu_A k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0 \quad (I.25.a)$$

$$D_{BL} \left[\frac{d^2 C_{BL}(x)}{dx^2} \right] + \nu_B k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0 \quad (I.25.b)$$

On utilise les conditions aux limites suivantes pour les intégrations :

$$x = 0 \quad C_{AL} = C_{ALi} \quad \frac{dC_{BL}(x)}{dx} = 0 \quad (I.26)$$

$$x = \delta \quad C_{AL}(\delta) = C_{AL} \quad C_{BL}(\delta) = C_{BL} \quad (I.27)$$

Remarque

La relation (I.26) résulte du non transfert du composé considéré vers la phase gazeuse, c'est-à-dire il n'y a pas désorption du CO_2 .

En combinant les équations (I.25.a) et (I.25.b) on obtient :

$$\frac{d^2 C_{BL}(x)}{dx^2} = \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \quad (I.28)$$

En intégrant deux fois et en utilisant les conditions aux limites, on obtient :

$$\frac{dC_{BL}(x)}{dx} = \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{dC_{AL}(x)}{dx} + C1 \quad (I.29)$$

pour $x=0$, $\frac{dC_{BL}(x)}{dx} = 0$, alors : $\frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \Big|_{x=0} + C1 = 0 \Rightarrow$

$$C1 = -\frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \Big|_{x=0} \quad (I.30)$$

$$\frac{dC_{BL}(x)}{dx} = \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} - \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \Big|_{x=0} \right) \quad (I.31)$$

$$\Rightarrow C_{BL}(x) = \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \left(C_{AL}(x) - x \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \Big|_{x=0} \right) + C2 \quad (I.32)$$

Avec: $C_{BL}(\delta) = C_{BL}$, donc :

$$\frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \left(C_{AL}(\delta) - \delta \frac{dC_{AL}(\delta)}{dx} \Big|_{x=0} \right) + C2 = C_{BL} \Rightarrow$$

$$C2 = C_{BL} - \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \left(C_{AL}(\delta) - \delta \frac{dC_{AL}(\delta)}{dx} \Big|_{x=0} \right) \quad (I.33)$$

Donc :

$$\begin{aligned} C_{BL}(x) &= C_{BL} + \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \left[(\delta - x) \frac{dC_{AL}(\delta)}{dx} \Big|_{x=0} - C_{AL}(\delta) + C_{AL}(x) \right] \Rightarrow \\ C_{BL}(x) &= C_{BL} \left\{ 1 + \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{C_{AL}(x) - C_{AL}(\delta)}{C_{BL}} \left(1 + \frac{(\delta - x) \frac{dC_{AL}(\delta)}{dx} \Big|_{x=0}}{C_{AL}(x) - C_{AL}(\delta)} \right) \right\} \end{aligned} \quad (I.34)$$

$$\text{Mais : } [N'_1]_{x=0} = \frac{D_{AL}}{\delta} (C_{ALi} - C_{AL})$$

$$[N_1]_{x=0} = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=0}$$

Et donc :

$$E = \frac{[N_1]_{x=0}}{[N'_1]_{x=0}} = - \left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)_{x=0} \cdot \frac{\delta}{C_{ALi} - C_{AL}} \quad (I.35)$$

L'expression (I.34), s'écrit pour $x=0$ à l'interface et en utilisant (I.35) :

$$C_{BLi} = C_{BL} \left\{ 1 + \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{D_{AL}}{D_{BL}} \frac{C_{ALi}}{C_{BL}} (1-\lambda)(1-E) \right\} \quad (I.36.a)$$

En introduisant l'expression :

$$N_2 = \frac{1}{2} \frac{D_{BL}}{D_{AL}} \frac{C_{BL}}{C_{ALi}}$$

$$C_{BLi} = C_{BL} \left\{ 1 + \frac{(1-\lambda)(1-E)}{N_2} \right\} \quad (I.36.b)$$

Pour pouvoir exprimer $[N_1]_{x=0}$ il faut disposer du terme $\left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=0}$, on peut y parvenir en écrivant que le flux interfaciale répondant à l'équation (I.7) avec $C_{BL}(x) = C_{BLi}$ pratiquement constant près de l'interface, car : $\left(\frac{dC_{BL}(x)}{dx} \right)_{x=0} = 0$ (d'après I.26)

Donc on peut écrire :

$$D_{AL} \left(\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right) = -\nu_A k C_{BLi} C_{AL}(x) \quad \text{pour } x \text{ voisin de } 0 \quad (I.37)$$

On remarque que cette expression est très similaire à (I.8) où l'on a remplacé C_{BL} par C_{BLi} .

Avec les mêmes conditions aux limites que celles sur $C_{AL}(x)$ données dans (I.9) et de manière similaire, on obtient alors :

$$[N_1]_{x=0} = k_A \frac{\frac{\sqrt{-\nu_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A}}{\text{th} \left(\frac{\sqrt{-\nu_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A} \right)} \left[C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{\text{ch} \left(\frac{\sqrt{-\nu_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A} \right)} \right] \quad (I.38)$$

On remarque que cette équation est identique à la relation (I.17) à la différence que C_{BL} a été remplacé par C_{BLi} .

Le facteur d'accélération peut donc s'écrire en utilisant (I.16) et (1.36.b) :

$$E = \frac{[N_1]_{x=0}}{[N'_1]_{x=0}} = \frac{Ha \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}}}{th \left[Ha \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}} \right]} \frac{1 - \frac{\lambda}{ch \left[Ha \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}} \right]}}{1 - \lambda} \quad (I.39)$$

N_1 qui correspond au flux avec réaction chimique et N'_1 le flux sans réaction chimique.

I.3.4. Expression de Kishinevskii [KIS79]

Afin de résoudre l'équation (I.38), et pouvoir calculer le flux local F_A du composé A transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide, nous avons une expression fournie par Kishinevskii qui est de la forme suivante :

$$E = 1 + \frac{Ha}{A} [1 - \exp(-0.65 Ha \sqrt{A})] \quad (I.40)$$

Avec :

$$A = \frac{Ha}{N_2} + \exp\left(\frac{0.68}{Ha} - \frac{0.45}{N_2} Ha\right) \quad (I.41)$$

L'algorithme qui permet d'obtenir E de manière itérative est le suivant [SED04] :

- Nous commençons par calculer le nombre de Hatta (Ha) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k C_{BL} D_{AL}}}{k_{AL}} \quad (I.42)$$

- Puis, nous estimons une valeur de E en posant $E(1) = Ha$ et nous calculons ainsi C_{Ali} et N_2 :

$$C_{Ali} = \frac{K_{Ag} C_{Ag}}{E(i) K_{Al} + m K_{Ag}} \quad (I.43.a)$$

$$N_2 = \frac{1}{2} \frac{D_{Bl}}{D_{Al}} \frac{C_{Bl}}{C_{Ali}} \quad (I.43.b)$$

- Nous estimons E (i+1) à partir de (I.40) et (I.41) :

Si la valeur de E (i+1) est différente de E (i), nous poursuivons le calcul itératif jusqu'à ce que $E(i+1) \approx E(i)$. La valeur de E (n) est alors prise comme valeur de E.

Le flux N_A transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide est donné par :

$$N_A = E_{(final)} K_{Al} C_{Ali(final)} \quad (I.44)$$

Le flux est calculé à partir de :

$$F_A = a E_{(final)} K_{Al} C_{Ali (final)} \quad (I.45)$$

L'Aire inter faciale a est calculée d'après la formule de Onda et Col :

$$a = 469,1[1 - \exp(-3,3.U_L^{0,4})] \quad (I.46)$$

I.3.5. Bilan de matière dans le sens longitudinal

Dans le but d'alléger la structure du modèle et simplifier le traitement numérique, nous avons adopté les hypothèses suivantes [SEL02] :

- Il n y a pas de résistance en phase gazeuse,
- Toutes les propriétés physiques du gaz et du liquide sont constantes le long de la colonne et au cours du temps,
- Le processus est isotherme.
- Réaction rapide entre le CO₂ et la MEA (Ha > 5).
- La dispersion axiale est négligeable dans la phase gazeuse et dans la phase liquide.

Dans ces conditions, les équations du modèle se réduisent à l'écriture des bilans de matière partiels dans chaque phase, auxquelles s'ajoutent les relations traduisant les conditions aux limites et d'équilibre.

Puisque, nous nous intéressons à l'évolution de la concentration du CO₂ et de la MEA le long de la colonne d'absorption, nous avons effectué le bilan de matière sur le CO₂ dans la phase gazeuse et dans la phase liquide sur un élément (dz) et le bilan de matière sur la MEA en phase liquide (figure I.4).

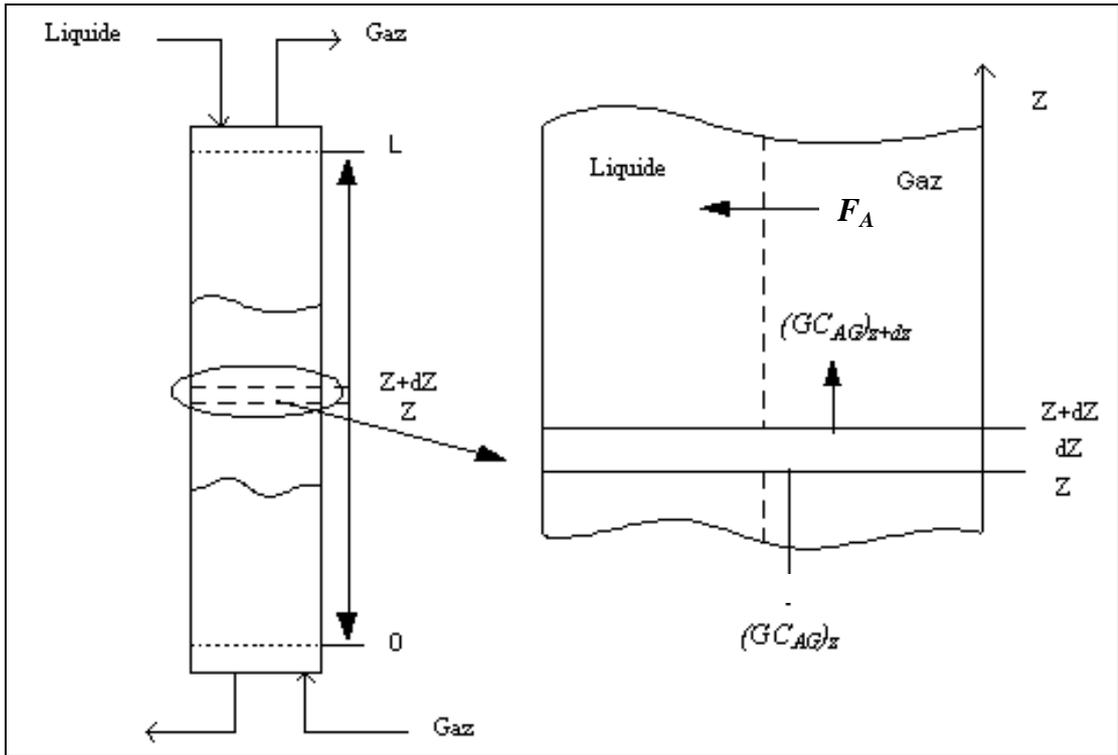


Figure I.4. Bilan de matière sur une tranche élémentaire (dz) dans le sens longitudinal

- Le bilan de matière pour le CO₂ dans la phase gazeuse pour une tranche élémentaire de hauteur dz et de largeur (z+dz) s'écrit : [SED04]

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:

$$(GC_{Ag})_z = (GC_{Ag})_{z+dz} + F_a S dz + S \frac{dC_{Ag}}{dt} dz \tag{I.47}$$

Or :

$$(G C_{AG})_{z+dz} = (G C_{AG})_z + \frac{d}{dz} (G C_{AG}) dz \tag{I.48}$$

En remplaçant dans (I.47), on obtient :

$$U_g \frac{dC_{Ag}}{dz} + F_a = -\frac{dC_{Ag}}{dt} \tag{I.49}$$

$U_g = G/S$ (m/s) étant la vitesse moyenne d'écoulement.

- Dans la phase liquide, le CO₂ réagit avec le monoéthanolamine (MEA) suivant la formule : [TON92], [PIN93]



La vitesse r_A de cette réaction (mol/m³.s) a la forme suivante: $r_A = k C_{Al}C_{Bl}$

$$\text{Avec : } \text{Log}_{10} k = 10,99 - \frac{2152}{T} \quad (\text{l/mole.s}) \quad (I.51)$$

T : Température (K)

k : Constante de la vitesse de la réaction (l/mol.s)

En tenant compte de l'expression de r_A , le bilan de matière pour le CO₂ dans la phase liquide donne:

Quantité de soluté à l'entrée (z) = quantité de soluté à la sortie (z+dz) + quantité de soluté transféré de la phase gazeuse à la phase liquide + quantité de soluté apparaissant ou disparaissant par unité de temps+ accumulation

$$(LC_{Al})_z = (LC_{Al})_{z+dz} + F_A S dz - [k C_{Al} C_{Bl}] S dz + S \frac{dC_{Al}}{dt} dz \quad (I.52)$$

$$\text{Or: } (LC_{Al})_{z+dz} = (LC_{Al})_z + \frac{d}{dz}(LC_{Al})_z \quad (I.53)$$

$$\frac{d}{dz}(LC_{Al})_z + F_A \cdot S \cdot dz - (k \cdot C_{Al} \cdot C_{Bl}) \cdot S \cdot dz + S \frac{dC_{Al}}{dt} dz = 0 \quad (I.54)$$

D'où:

$$U_l \frac{dC_{Al}}{dz} + F_A - [k C_{Al} C_{Bl}] + \frac{dC_{Al}}{dt} = 0 \quad (I.55)$$

$U_l = L/S$ (m/s) étant la vitesse moyenne d'écoulement du flux liquide.

D'une manière générale, la réaction entre le CO₂ et le MEA est considérée comme une réaction rapide (nombre de Hatta > 5) [TRA84], ce qui implique qu'il n'y a pas d'accumulation du CO₂ dans la phase liquide et pas de variation en fonction du temps, on peut donc écrire :

$$\begin{cases} \frac{dC_{Al}}{dz} = 0 \\ \frac{dC_{Al}}{dt} = 0 \end{cases} \Rightarrow F_A = [k C_{Al} C_{Bl}] \quad (I.56)$$

Ce qui veut dire que la quantité du CO₂ transférée dans la phase liquide réagit totalement avec la MEA.

- Le bilan de matière sur la MEA dans la phase liquide, en tenant compte du coefficient stoechiométrique de la réaction (I. 50) et du fait que la MEA ne peut pas passer dans la phase gazeuse, donne :

$$(LC_{Bl})_z = (LC_{Bl})_{z+dz} - 2[k C_{Al} C_{Bl}] S dz - S \frac{dC_{Bl}}{dt} dz \quad (I.57)$$

$$(LC_{Bl})_{z+dz} = (LC_{Bl})_z + \frac{d}{dz}(LC_{Bl})_z \quad (I.58)$$

$$\frac{d}{dz}(LC_{Bl})_z - 2(k.C_{Al}.C_{Bl}).S.dz - S \frac{dC_{Bl}}{dt} dz = 0 \quad (I.59)$$

D' où:

$$U_l \frac{dC_{Bl}}{dz} - 2 [k C_{Al} C_{Bl}] = \frac{dC_{Bl}}{dt} \quad (I.60)$$

En tenant compte de (I.56), on obtient :

$$U_l \frac{dC_{Bl}}{dz} - 2 F_A = \frac{dC_{Bl}}{dt} \quad (I.61)$$

Les bilans de matière sur le CO₂ et la MEA dans les phases liquide et gazeuse se réduisent aux équations suivantes :

- Bilan sur le CO₂ dans la phase gazeuse :

$$U_g \frac{dC_{Ag}}{dz} + F_A = - \frac{dC_{Ag}}{dt} \quad (I.62)$$

- Bilan de la MEA dans la phase liquide :

$$U_l \frac{dC_{Bl}}{dz} - 2 F_A = \frac{dC_{Bl}}{dt} \quad (I.63)$$

- Expression de F_A :

$$F_A = [Na] a \quad (I.64)$$

$$[Na] = E.[N'a] = E.k_{AL}.(C_{ALi} - C_{AL}) \quad \text{avec : } C_{AL} \approx 0 \quad (\text{réaction rapide}) \quad (I.65)$$

Donc :

$$F_A = a E K_{Al} C_{Ali} \quad (I.66)$$

En admettant que l'équilibre est établi à l'interface gaz - liquide et pour des faibles concentrations du CO₂, nous pouvons écrire :

$$C_{AGi} = m \cdot C_{Ali} \quad (I.67)$$

$$[N_A] = k_{AG}(C_{AG} - m \cdot C_{Ali}) = E \cdot k_{AL} \cdot C_{Ali} \quad (I.68)$$

$$D' où: C_{Ali} = \frac{K_{Ag} C_{Ag}}{E K_{Al} + m K_{Ag}} \quad (I.69)$$

Il faut finalement tenir compte des conditions aux limites qui sont pour le gaz la concentration du CO₂ en bas de la colonne ou concentration d'entrée C_{Age} et pour le liquide la concentration de la MEA en haut de la colonne ou concentration d'entrée C_{Ble}.

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

$$\begin{cases} U_g \frac{dC_{Ag}}{dz} + F_A = - \frac{dC_{Ag}}{dt} \\ U_l \frac{dC_{Bl}}{dz} - 2 F_A = \frac{dC_{Bl}}{dt} \end{cases} \quad (I.70.a)$$

F_A étant donné par (I.66),

Avec les conditions aux limites suivantes:

$$\begin{cases} C_{Ag} \Big|_{z=0} = C_{Age} \\ C_{Bl} \Big|_{z=h} = C_{Ble} \end{cases} \quad (I.70.b)$$

Les valeurs des différents paramètres utilisés lors de la simulation sont données dans le tableau suivant :

$S = 0,0044 \text{ m}^2$ $m = 1,18$ $\log_{10}(k) = 10,99 - 2152 / T$ $k = 5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ $D_{Al} = 1,51 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $D_{Bl} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $k_{Ag} = 5,81 \cdot 10^{-2} \cdot (U_G)^{0,7}$ $k_{Al} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot (U_L)^{0,67}$ $a = 469,1 [1 - \exp(-3,3 \cdot U_L^{0,4})]$	$S = 0,0044 \text{ m}^2$ $m = 1,2$ $\log_{10}(k) = 10,99 - 2152 / T$ $k = 13 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ $D_{Al} = 1,51 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $D_{Bl} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $k_{Ag} = 5,81 \cdot 10^{-2} \cdot (U_G)^{0,7}$ $k_{Al} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot (U_L)^{0,67}$ $a = 469,1 [1 - \exp(-3,3 \cdot U_L^{0,4})]$
---	---

Tableau 1.1. Paramètres du modèle pour T=25°C et T=40°C

I. 4. Simulation dynamique de la colonne d'absorption

I.4.1. Equations aux dérivées partielles EDP

Les équations aux dérivées partielles sont utilisées dans les modèles mathématiques de nombreux phénomènes physiques, là où il y a propagation de grandeurs physiques, comme par exemple, le transfert de la chaleur, la dynamique des fluides, la propagation des ondes, etc. [RAP01]. Ce type de modèles mathématiques relie certaines variables dépendantes et leurs dérivées à d'autres variables indépendantes représentant l'espace et/ou le temps :

Dans les systèmes à paramètres localisés, les variables dépendent uniquement du temps, on considère donc que tous les paramètres peuvent être ramenés en un point, par exemple, quand on étudie la température d'un fluide dans un récipient, cette dernière est supposée être la même dans tout le récipient à un instant donné, et on peut étudier le changement de la température comme une fonction du temps basé sur le débit du fluide. Ainsi le modèle simplifié dépend seulement d'une variable, le temps et des dérivées du temps. Les équations du modèle sont des équations différentielles ordinaires. [RAP01]

Dans les systèmes à paramètres répartis, les variables dépendent non seulement du temps mais aussi de leur position dans l'espace, ces systèmes sont décrits par des jeux d'équations aux dérivées partielles. Pour le même exemple que précédemment, on peut considérer cette fois-ci que la température varie selon la position dans le récipient, et sera donc fonction des coordonnées d'espace et de temps. Les dérivées qui ocurrent dans ces types de modèles sont des dérivées partielles par rapport aux variables spatiales et temporelles. [ILT06]

Les équations différentielles qui font appel à des dérivées partielles sont donc appelées les équations aux dérivées partielles (Partial Differential Equations). Si une dépendance par rapport au temps est présente, les modèles sont appelés modèles dynamiques, sinon ce sont des modèles stationnaires. [RAP01]

L'ordre d'une équation différentielle est défini comme étant le plus grand ordre de différentiation présent dans cette équation. En général, l'ordre le plus utilisé dans les modèles est le deuxième ordre.

Le domaine de définition i.e. la région géométrique dans laquelle l'EDP est définie, est dans la plus part des cas une région fermée dans l'espace définie par des variables indépendantes. [RAP01]

Les conditions aux limites dans un problème d'EDP spécifient le comportement du modèle aux limites du domaine et contiennent souvent des dérivées du premier ordre.

I. 4.2. Description de la fonction pdepe

La fonction pdepe résout les EDPs dynamiques de type elliptique et parabolique dans un espace unidimensionnel, la variable dépendante U peut être aussi bien scalaire que vectorielle.

La discrétisation de l'espace permet d'obtenir des EDO ordinaires à partir des équations aux dérivées partielles initiales. Le maillage d'espace correspondant sur $[a, b]$ sera défini par le vecteur x_{mesh} avec $x_{\text{mesh}}(1)=a$ et $x_{\text{mesh}}(m)=b$.

La résolution des EDOs résultant de la discrétisation de l'espace sera effectuée sur l'intervalle de temps $[t_0, t_f]$ avec également un maillage de temps donné par le vecteur $tspan$, avec $tspan(1)=t_0$ et $tspan(n)=t_f$.

La forme générale des équations pdepe est : [MAT6.5]

$$C(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} (x^m f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})) + s(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \quad (I.71)$$

Pour $t=t_0$ et tout x , les composants de la solution satisfont la condition initiale de la forme :

$$U(x, t_0) = u_0(x) \quad (I.72)$$

Sur les limites de l'intervalle $[a, b]$ ($x=a$ ou $x=b$), et pour tout t , les conditions aux limites sont de la forme :

$$p(x, t, u) + q(x, t) f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0 \quad (I.73)$$

A noter que des deux coefficients p et q , il n'y a que p qui dépend de u .

Dans l'appel de :

`sol=pdepe(m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan) :`

- m correspond aux coordonnées cartésiennes ($m=0$), cylindriques ($m=1$) ou sphériques ($m=2$).
- $xmesh$ définit le maillage dans l'espace
- $tspan$ définit le maillage dans le temps
- l'équation aux dérivées partielles en elle-même est définie par les trois fonctions c , f , et s de l'équation (I.71) calculées par la fonction `pdefun`. Elle est sous la forme :

$$[c, f, s] = pdefun(x, t, u, dudx) \quad (I.74)$$

La condition initiale est calculée par la fonction `icfun`, qui est sous la forme :

$$U = icfun(x) \quad (I.75)$$

Les conditions aux limites sont données par `bcfun`, elles sont sous la forme :

$$[pl, ql, pr, qr] = bcfun(xl, ul, xr, ur, t) \quad (I.76)$$

On a pour p et q de l'équation (I.73) deux paires de vecteurs colonnes, pl et ql évalués à la limite gauche $x_l=a$, même chose pour pr et qr à la limite droite $x_r=b$. ul est la solution approchée en $x_l=a$ et ur est la solution approchée en $x_r=b$.

Pdepe retourne la solution comme un tableau multidimensionnel sol. [MAT6.5]

$U_i = \text{sol}(j, k, i)$ est une approximation de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur solution u.

où j est l'indice correspondant au temps et k à l'espace.

L'élément $u_i(j,k) = \text{sol}(j,k,i)$ correspond à u_i évalué à $t = \text{tspan}(j)$ et $x = \text{xmesh}(k)$

$U_i = \text{sol}(j, :, i)$ approche le composant i de la solution à l'instant $\text{tspan}(j)$ et pour tous les points du maillage de l'espace .

$U_i = \text{sol}(:, k, i)$ approche le composant i de la solution pour la position $x = \text{xmesh}(k)$ pour tous les points du maillage de temps .

I.4.3. Validation du modèle mathématique développé (comparaison des résultats pratiques et théoriques)

Pour pouvoir démontrer la validité de notre modèle, nous avons effectué plusieurs essais de simulation et nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus de manière expérimentale [SED04]. L'ensemble des résultats obtenus à partir du dispositif pilote et par simulation sont donnés dans le tableau (I.2).

Discussion des résultats obtenus expérimentalement et par simulation

Le modèle mathématique élaboré permet de prédire les concentrations de CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne.

Les essais ont été effectués pour deux températures distinctes, qui sont 40°C et 25°C , et cela dans le but de montrer l'efficacité du modèle mathématique développé.

En ce qui concerne la concentration du CO_2 en sortie de la colonne, l'erreur entre la valeur théorique et la valeur expérimentale est inférieure à 3%.

Pour ce qui est de la concentration de la MEA, nous nous intéressons à la différence entre la quantité de MEA absorbée dans le cas théorique et dans le cas expérimental. La valeur moyenne de l'erreur est de l'ordre de 3.3%, sauf pour l'essai 13 où elle reste trop élevée.

Nous constatons donc que les concentrations obtenues théoriquement de la MEA et celles du CO_2 en sortie de la colonne sont en accord avec les résultats expérimentaux.

A noter que pour les deux essais que nous considérons par la suite dans notre étude, à savoir les essais 14 et 20, l'erreur sur la concentration de CO_2 est respectivement de 1.15% et 1.92% pour le premier et le second point de fonctionnement. Sur la concentration de la MEA, elle est de 1.79 % et 1.88 % pour le premier et le second point de fonctionnement respectivement.

Les erreurs entre les résultats de la simulation et ceux trouvés expérimentalement sont dues probablement aux différentes corrélations utilisées pour déterminer les paramètres physiques (l'aire interfaciale a a été estimée à partir de la corrélation d'Onda et col et cette dernière est valable à 20-30% près, [SED04]).

essai	T (°C)	Débit d'air (m ³ /s) 10 ⁻³	L (m ³ /s) 10 ⁻³	Débit CO ₂ (m ³ /s) 10 ⁻⁴	a (m ² /m ³)	C _{Be} (mo/l)	C _{Bs} exp (mo/l)	C _{Bs} modèle (mo/l)	C _{Ae} (mo/l) 10 ⁻³	C _{As} exp (mo/l) 10 ⁻³	C _{As} modèle (mo/l) 10 ⁻³
1	40	1.6528	0.0151	1.4287	135.5	0.5	0.175	0.165	3.25	1.88	1.83
2	40	1.6528	0.0151	2.7273	135.5	0.5	0.110	0.094	5.79	4.26	4.20
3	40	1.6528	0.0151	4	135.5	0.5	0.095	0.075	7.97	6.48	6.40
4	40	1.6528	0.0151	5	135.5	0,5	0.085	0.068	9.50	8.08	7.98
5	40	1.6528	0.0151	1.4287	135.5	1	0.500	0.491	3.25	1.15	1.14
6	40	1.6528	0.0151	2.7273	135.5	1	0.310	0.283	5.79	3.06	2.98
7	40	1.6528	0.0151	4	135.5	1	0.230	0.208	7.97	5.10	5.05
8	40	1.6528	0.0151	5	135.5	1	0.213	0.181	9.50	6.73	6.62
9	40	1.6528	0.0213	1.4287	151.9	0.5	0.210	0.206	3.25	1.53	1.51
10	40	1.6528	0.0213	2.7273	151.9	0.5	0.127	0.114	5.79	3.73	3.66
11	40	1.6528	0.0213	4	151.9	0.5	0.100	0.085	7.97	5.89	5.82
12	40	1.6528	0.0213	5	151.9	0.5	0.090	0.074	9.50	7.47	7.39
13	25	1.6528	0.0213	1.4287	151.9	0.5	0.260	0.350	3.25	1.82	1.73
14	25	1.6528	0.0213	2.7273	151.9	0.5	0.165	0.171	5.79	3.93	3.98
15	25	1.6528	0.0213	4	151.9	0.5	0.120	0.130	7.97	5.99	6.05
16	25	1.6528	0.0213	5	151.9	0.5	0.097	0.111	9.50	7.50	7.58
17	25	1.6528	0.0213	1.4287	151.9	1	0.650	0.678	3.25	1.17	1.34
18	25	1.6528	0.0213	2.7273	151.9	1	0.470	0.487	5.79	2.86	2.95
19	25	1.6528	0.0213	4	151.9	1	0.360	0.375	7.97	4.64	4.73
20	25	1.6528	0.0213	5	151.9	1	0.308	0.321	9.50	6.03	6.18

Tableau I.2. Valeurs des concentrations expérimentales et théoriques de la MEA et du CO₂ à la sortie de la colonne

I.4.4. Résultats de simulation en régime dynamique

Après avoir adapté l'équation de la colonne d'absorption à la fonction pdepe et après simulation de plusieurs situations, les résultats en régime dynamique sont présentés dans les figures ci-dessous.

Simulation en boucle ouverte

1. Premier point de fonctionnement

La concentration de CO₂ en entrée est de 5.79 mole/m³.

La valeur obtenue en régime permanent est de 3.975 mole/m³.

Débit de gaz nominal : 1.9255 l/s

Débit de liquide nominal : 0.0213 l/s

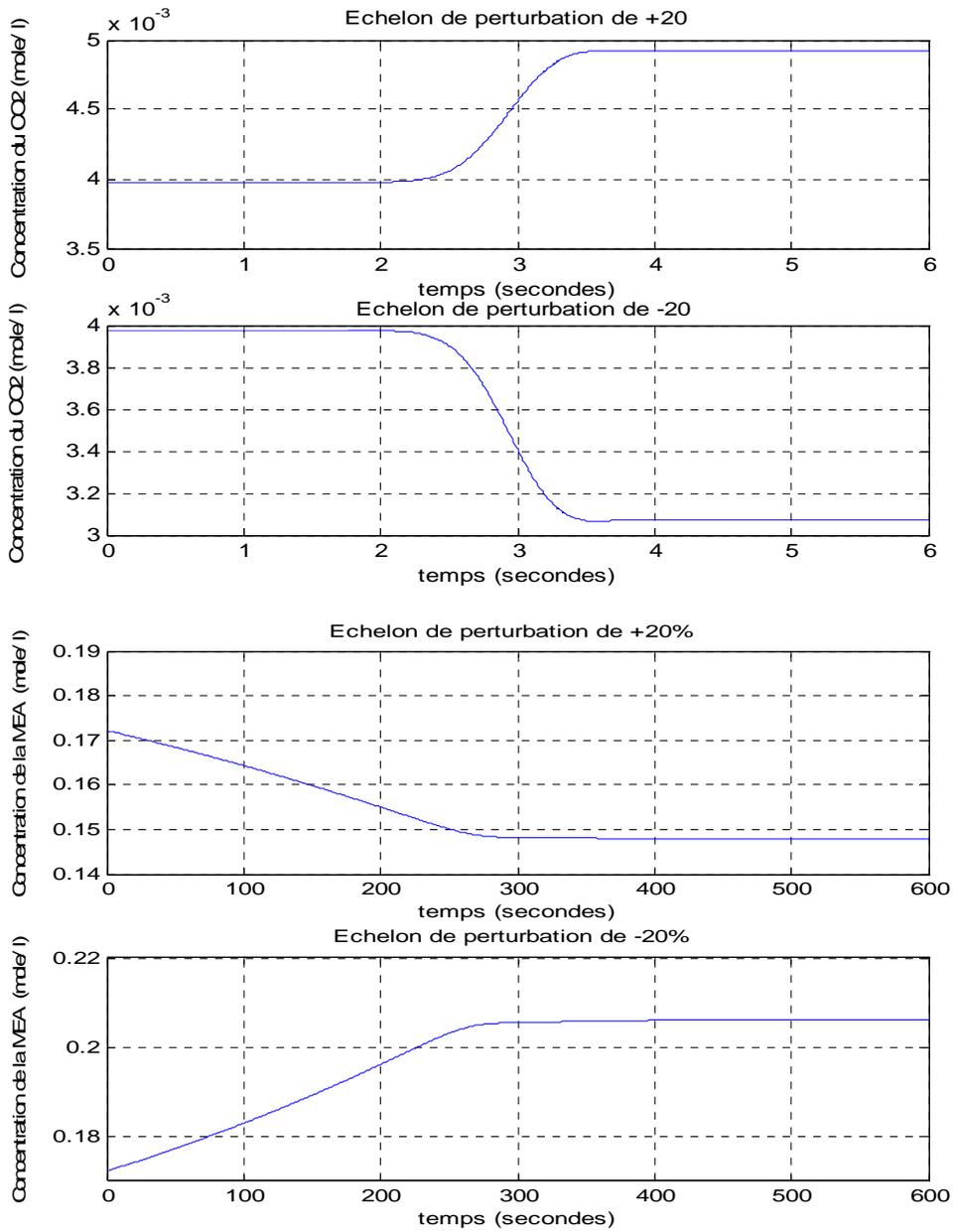


Figure I.5. Concentration du CO₂ et de la MEA en sortie pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

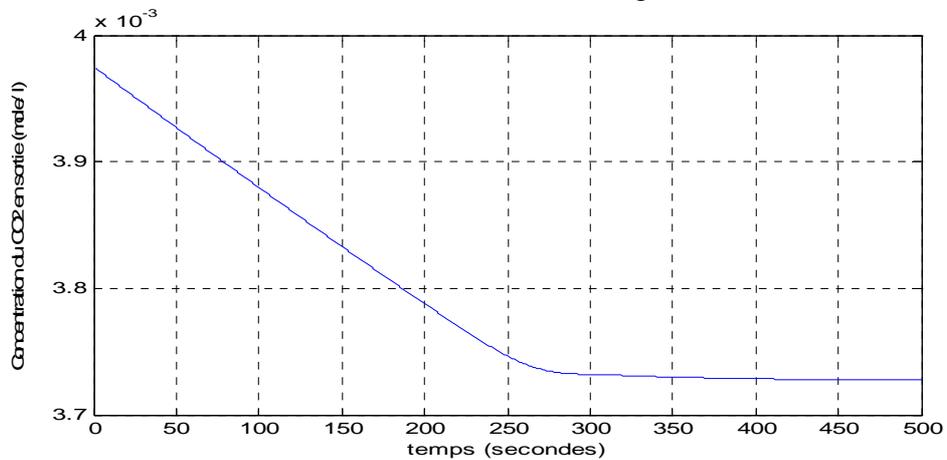


Figure I.6. Echelon de perturbation de + 20% sur C_{Be}

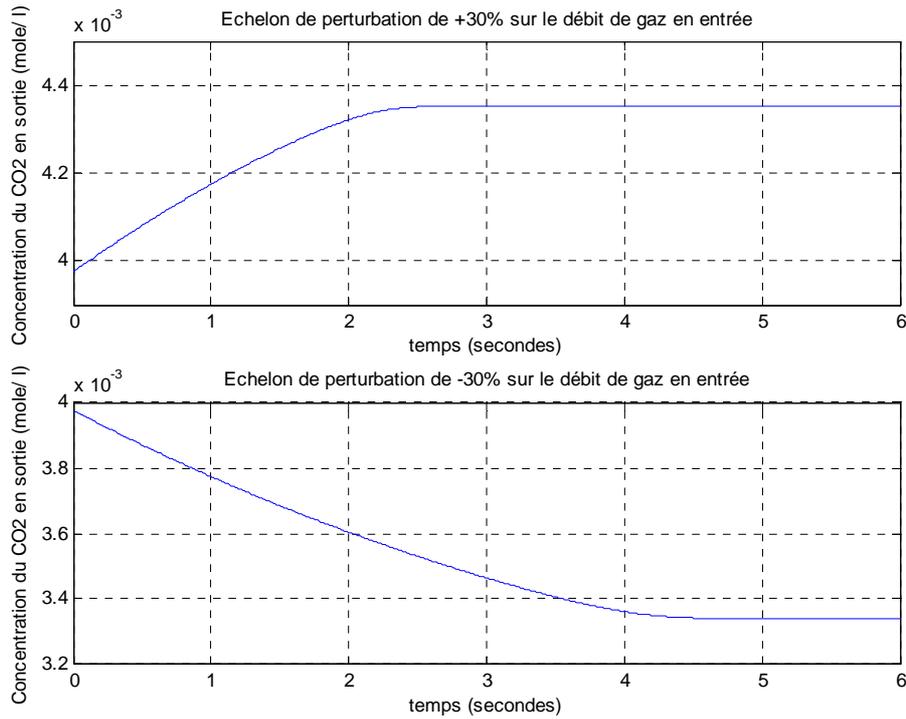


Figure I.7. Echelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée
Evolution de la concentration de CO₂ le long de la colonne en fonction du temps

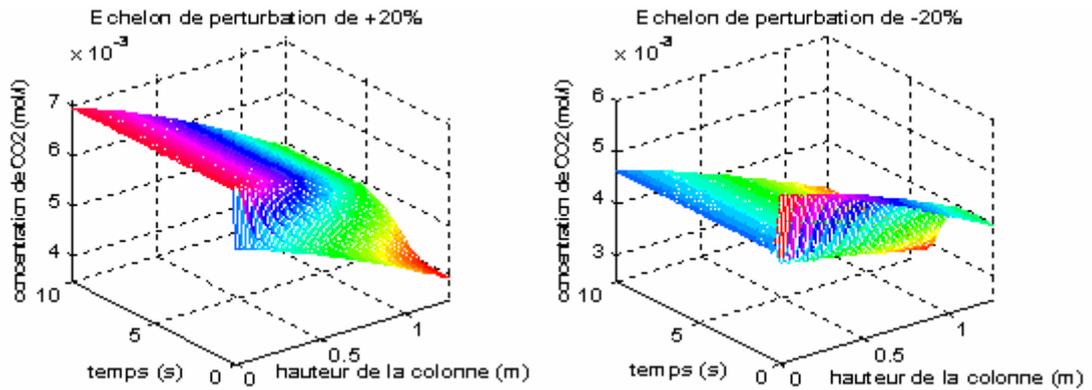


Figure I.8. Evolution de la concentration de CO₂ le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

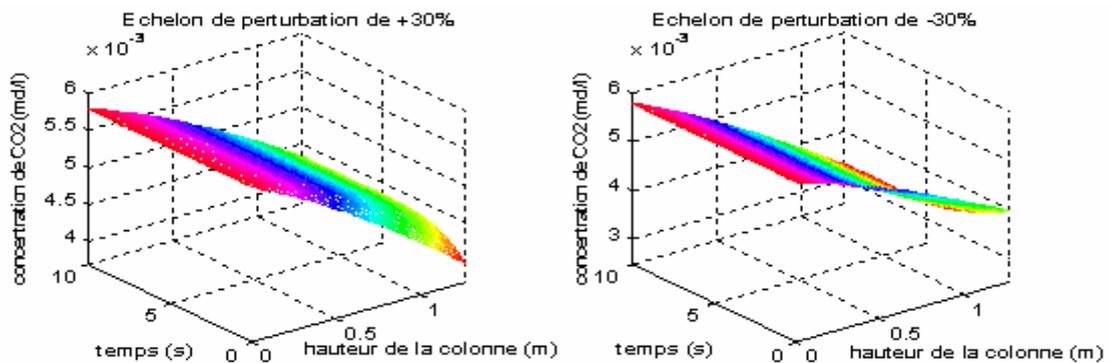


Figure I.9. Evolution de la concentration de CO₂ le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

2. Second point de fonctionnement

La concentration de CO₂ en entrée est de 9.5 mole/m³.

La valeur obtenue en régime permanent est de 6.147 mole/m³.

Débit de gaz nominal : 2.1529 l/s

Débit de liquide nominal : 0.0213 l/s

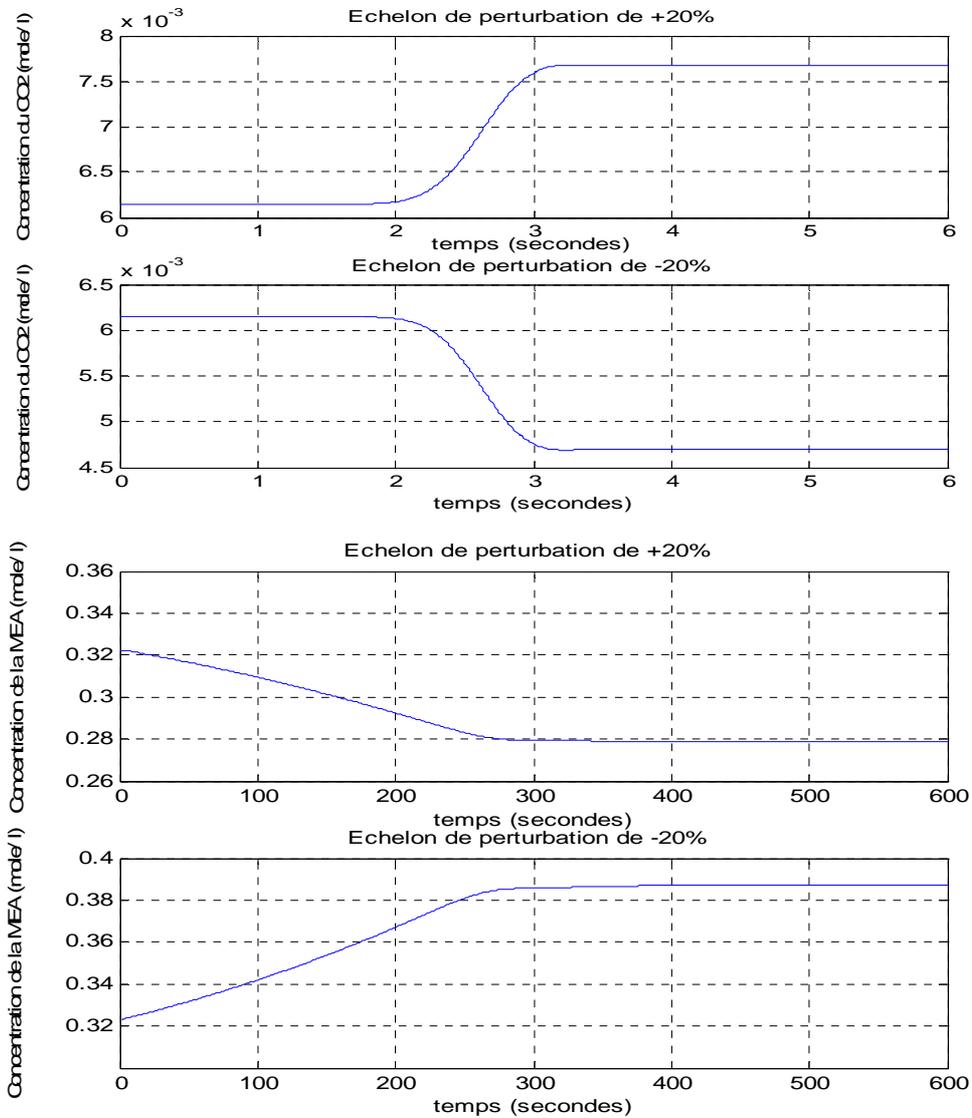


Figure I.10. Concentration du CO₂ et de MEA en sortie pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

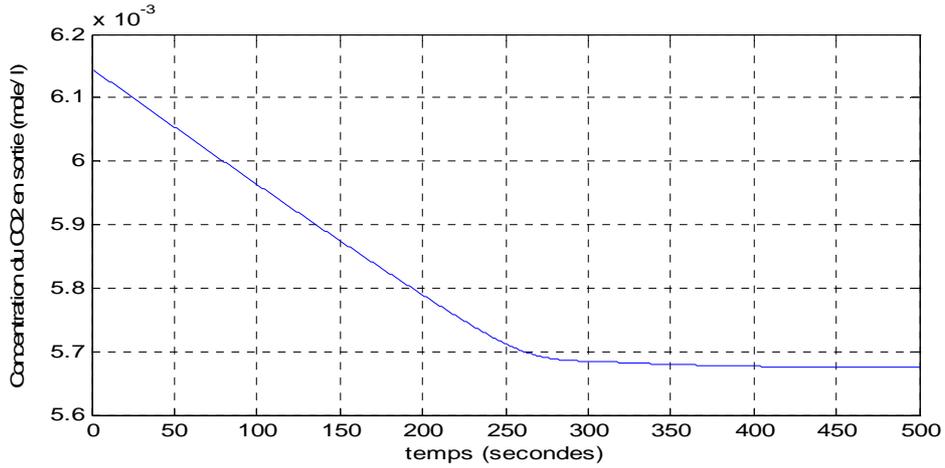


Figure I.11. Echelon de perturbation de + 20% sur C_{Be}

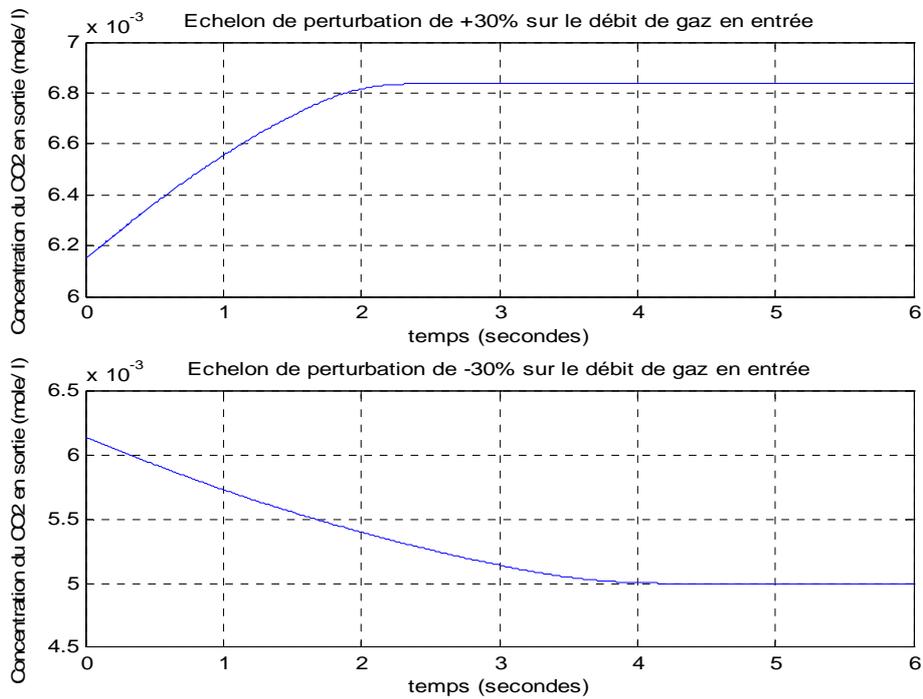


Figure I.12. Echelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée
Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne en fonction du temps

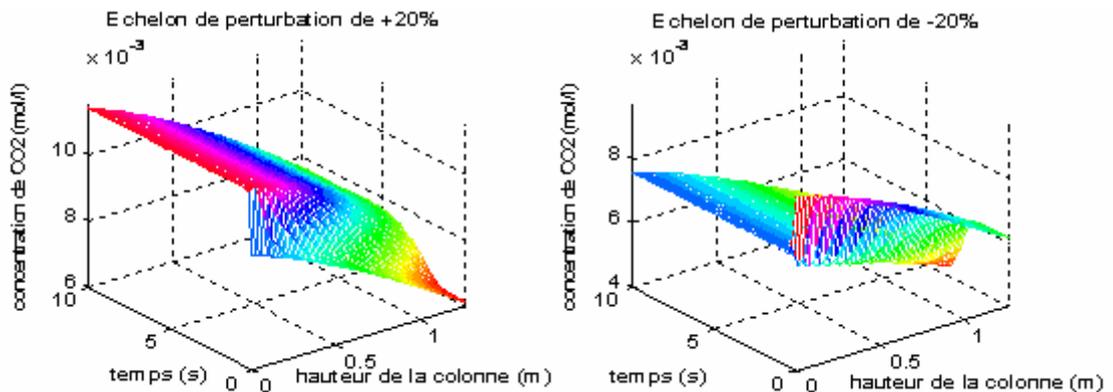


Figure I.13. Evolution de la concentration de CO_2 le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 20% sur la concentration de gaz en entrée

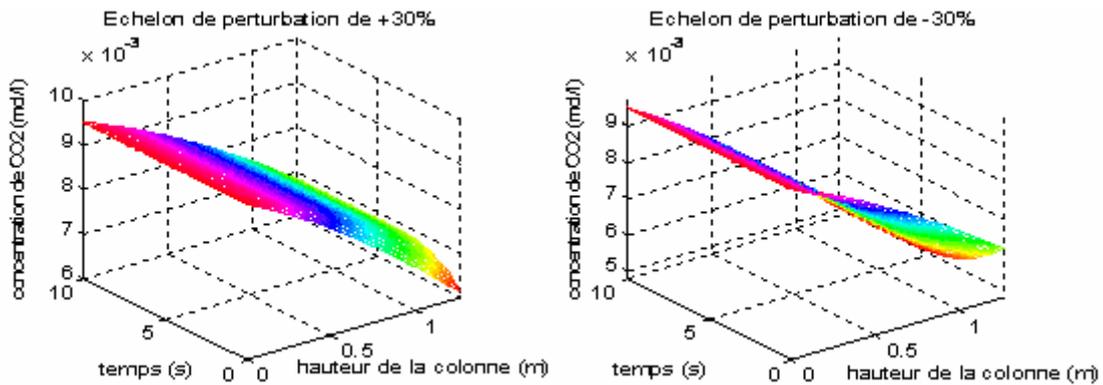


Figure I.14. Evolution de la concentration de CO₂ le long de la colonne pour un échelon de perturbation de +/- 30% sur le débit de gaz en entrée

Simulation de la régulation PI

Nous avons appliqué une Régulation PI au modèle dynamique de notre colonne d'absorption développé dans la partie modélisation. Pour faciliter la simulation de la colonne d'absorption, nous avons choisi une commande échantillonnée. La période d'échantillonnage choisie est égale à 0.5 seconde, la teneur régulée moyenne en sortie est de $3.975 \cdot 10^{-3}$ mole de CO₂ par litre de gaz pour le premier point de fonctionnement, et de $6.147 \cdot 10^{-3}$ mole de CO₂ par litre de gaz pour le second point de fonctionnement.

Les perturbations appliquées au système sont :

- Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée
- Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée
- Nous présenterons également un changement de la consigne, bien que ce ne soit pas le but de la commande

Les paramètres du régulateur PI sont :

$$\begin{cases} K_p = 2,2 & [K_p] = \frac{l^2}{mole \cdot s} \\ T_I = 0,1 & (secondes) \end{cases}$$

1. Premier point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

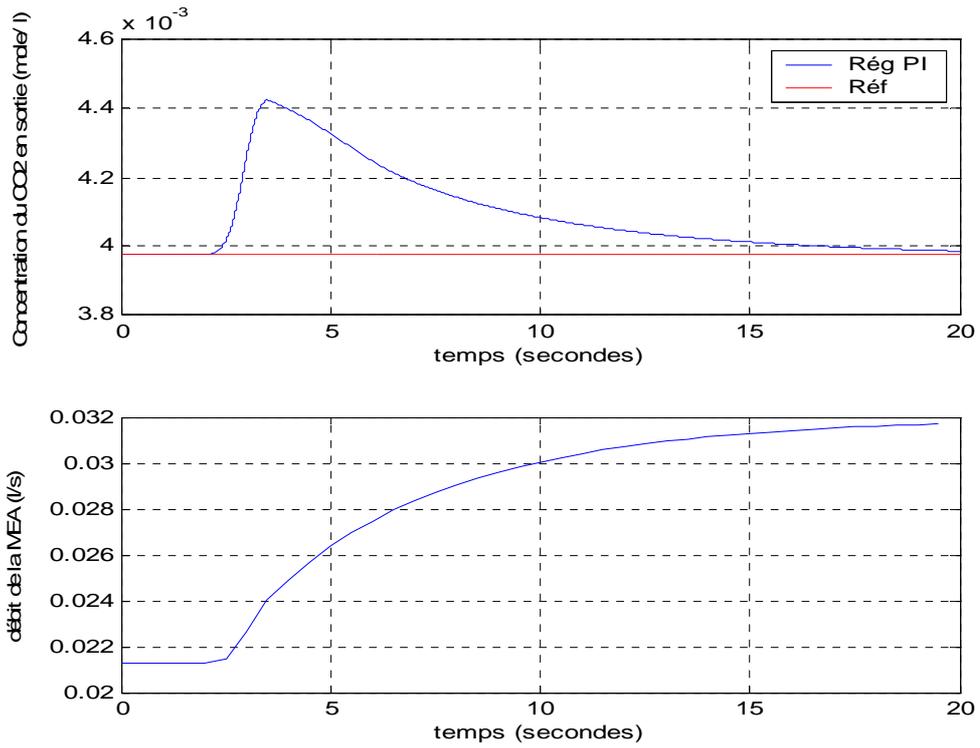


Figure I.15. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

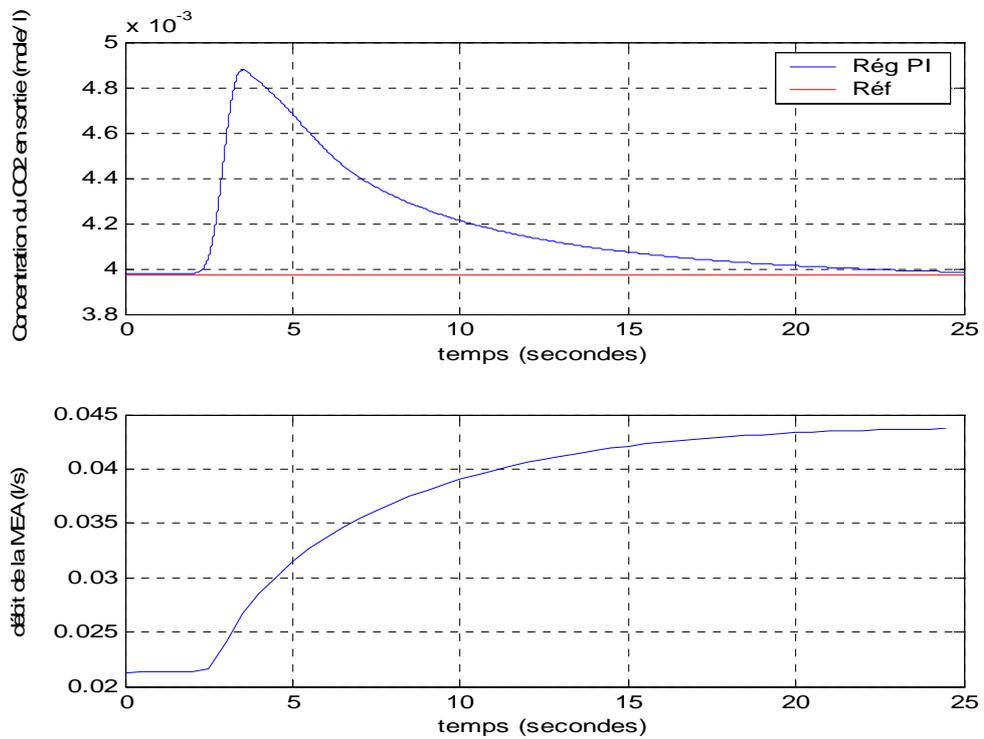


Figure I.16. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

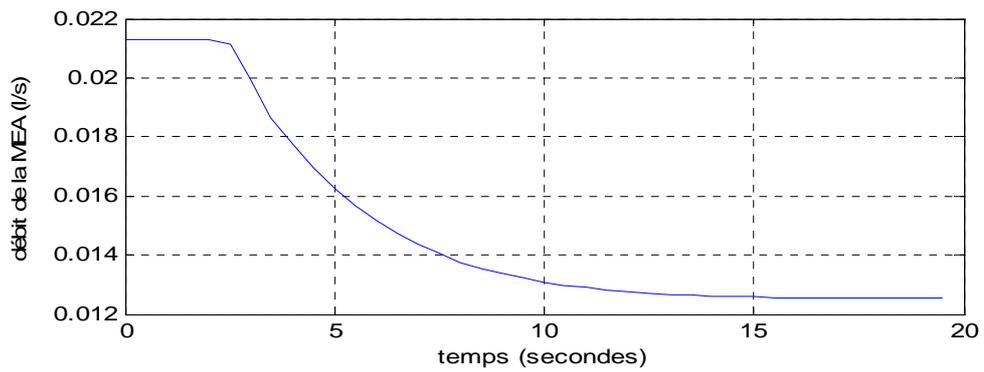
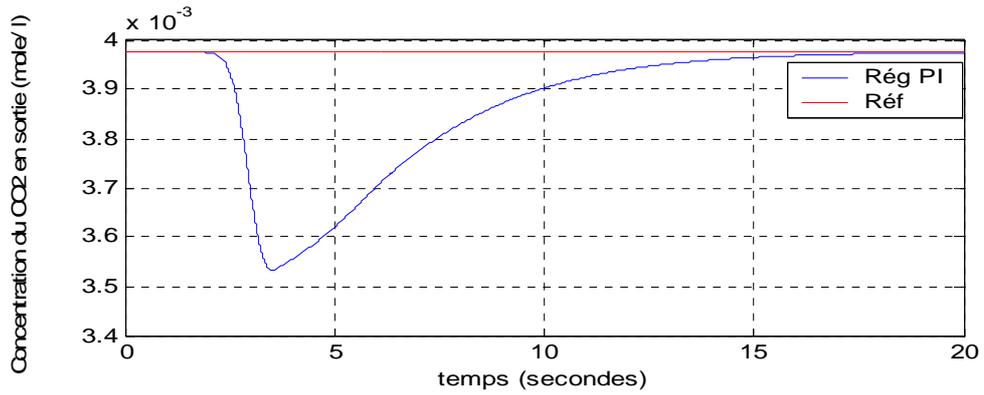


Figure I.17. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

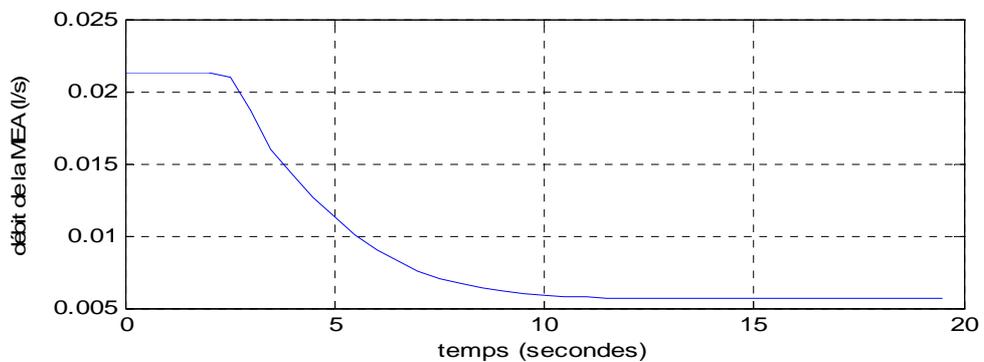
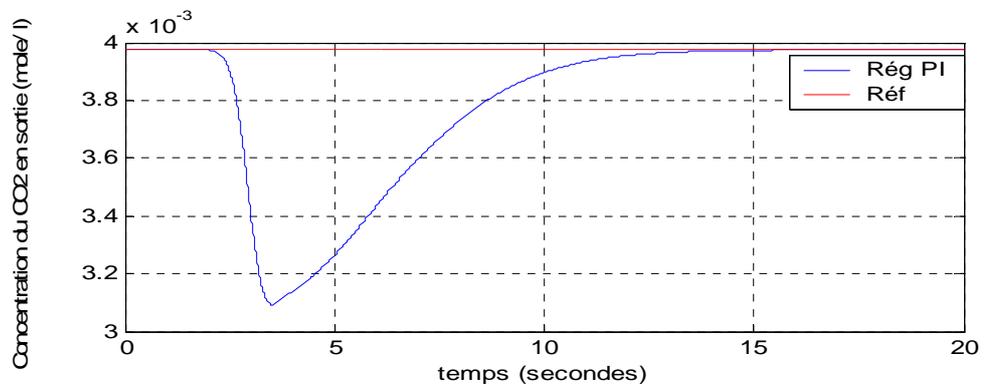


Figure I.18. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

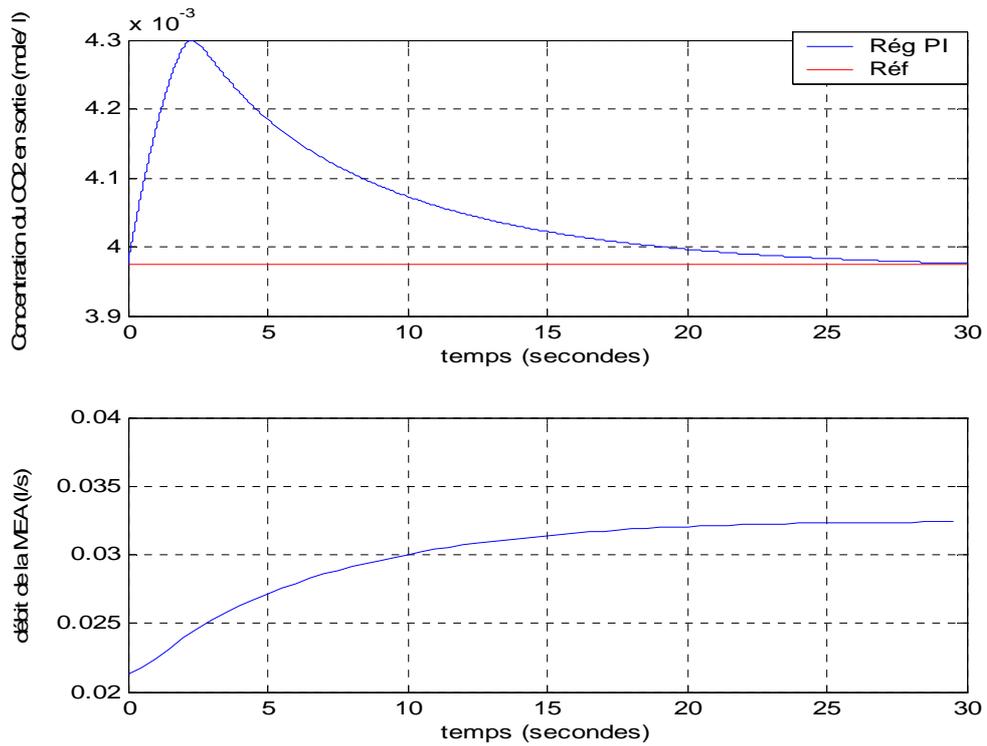


Figure I.19. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

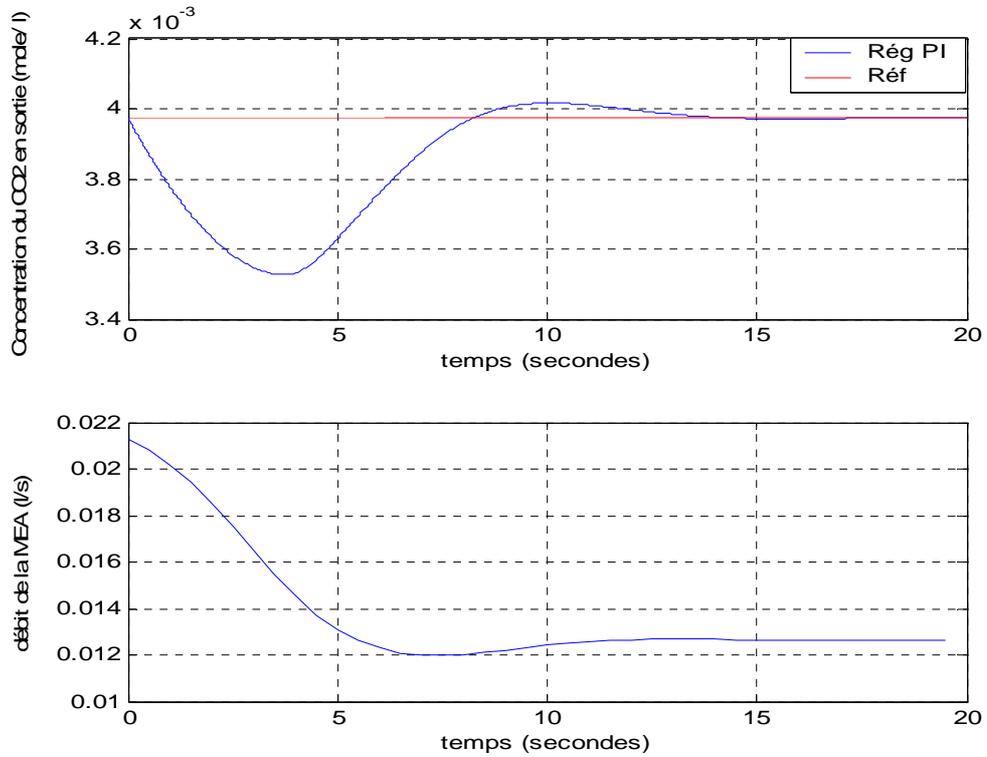


Figure I.20. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Variation de consigne

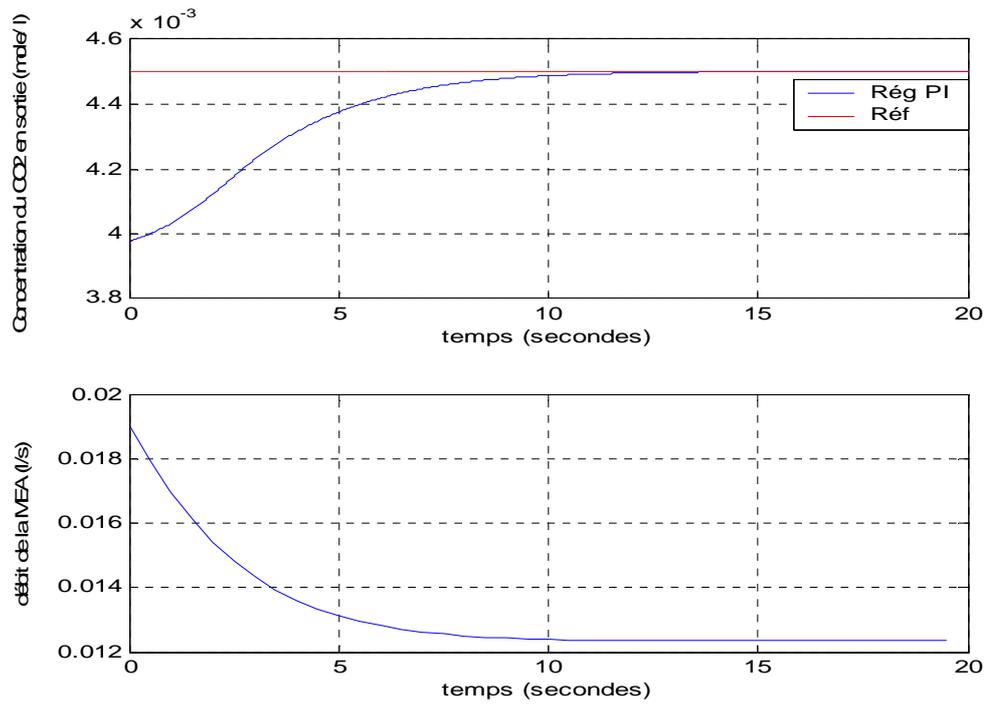


Figure I.21. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

2. Second point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

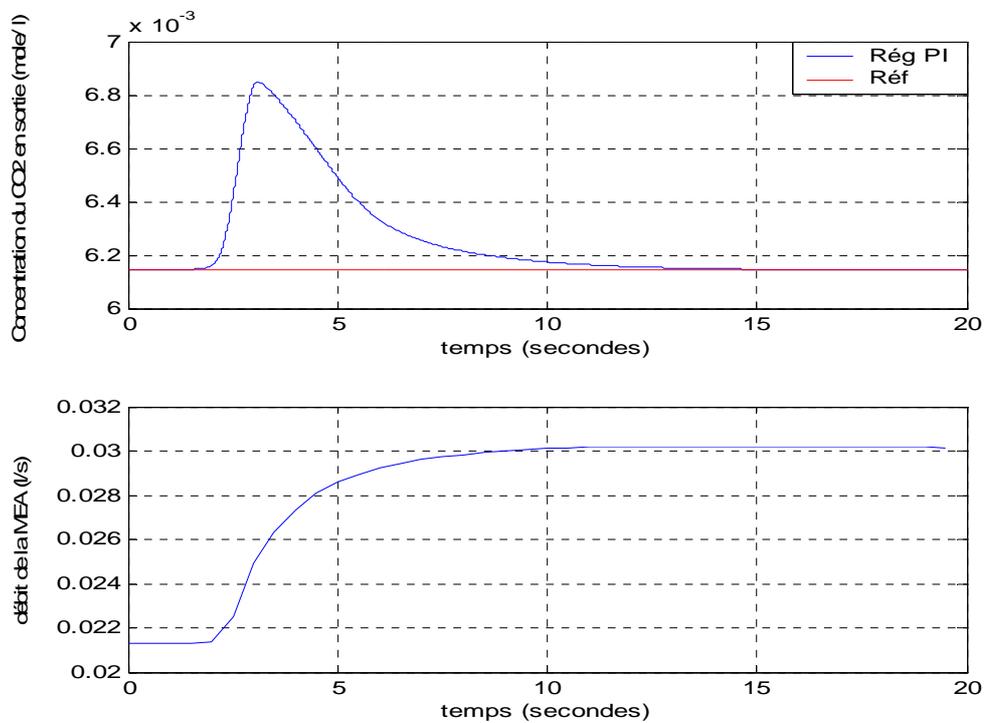


Figure I.22. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

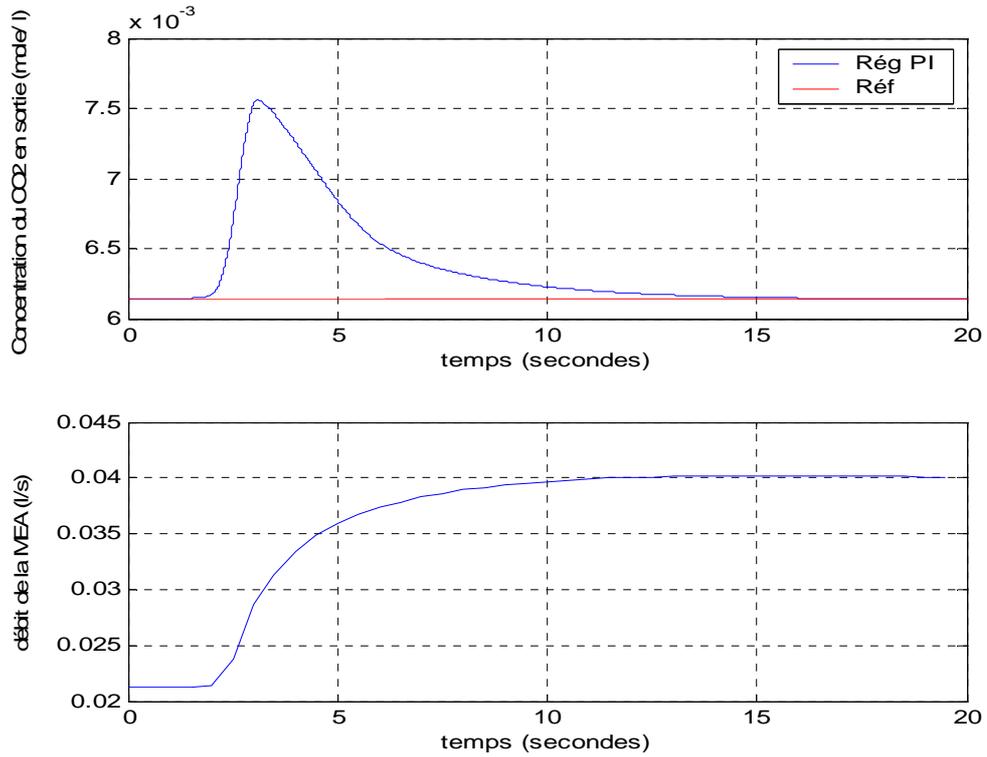


Figure I.23. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

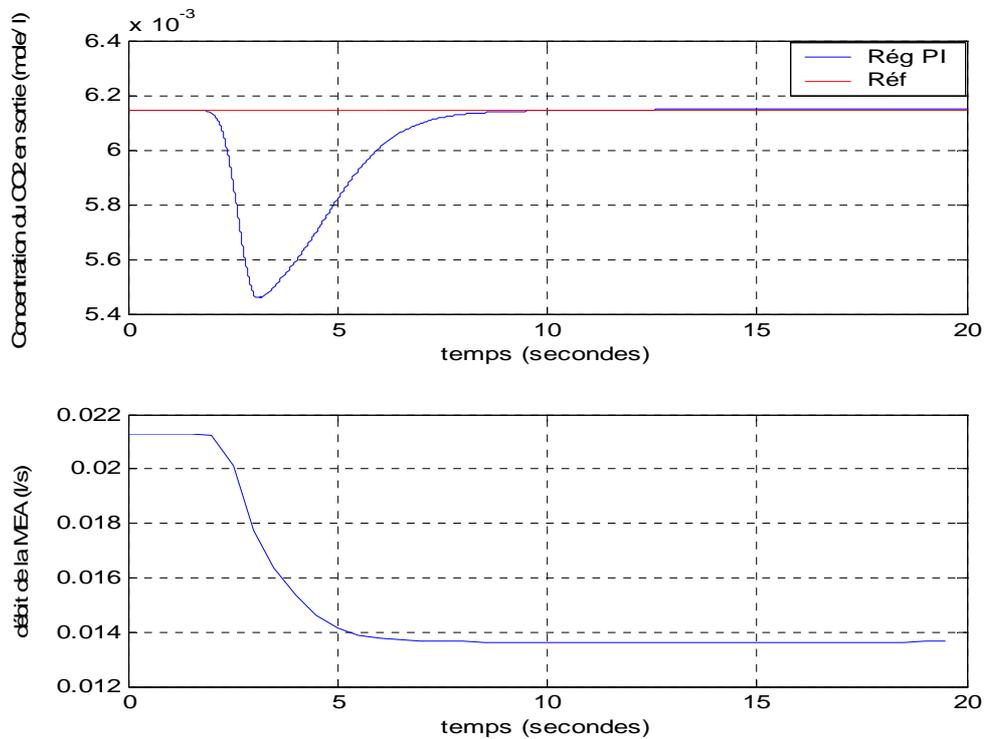


Figure I.24. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

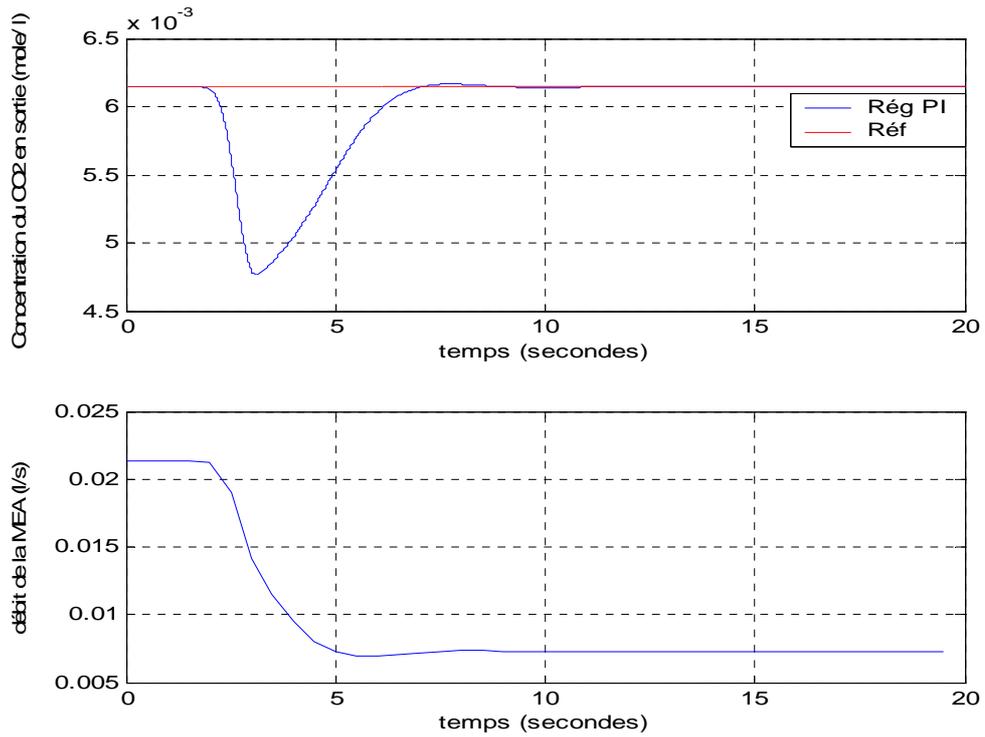


Figure I.25. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

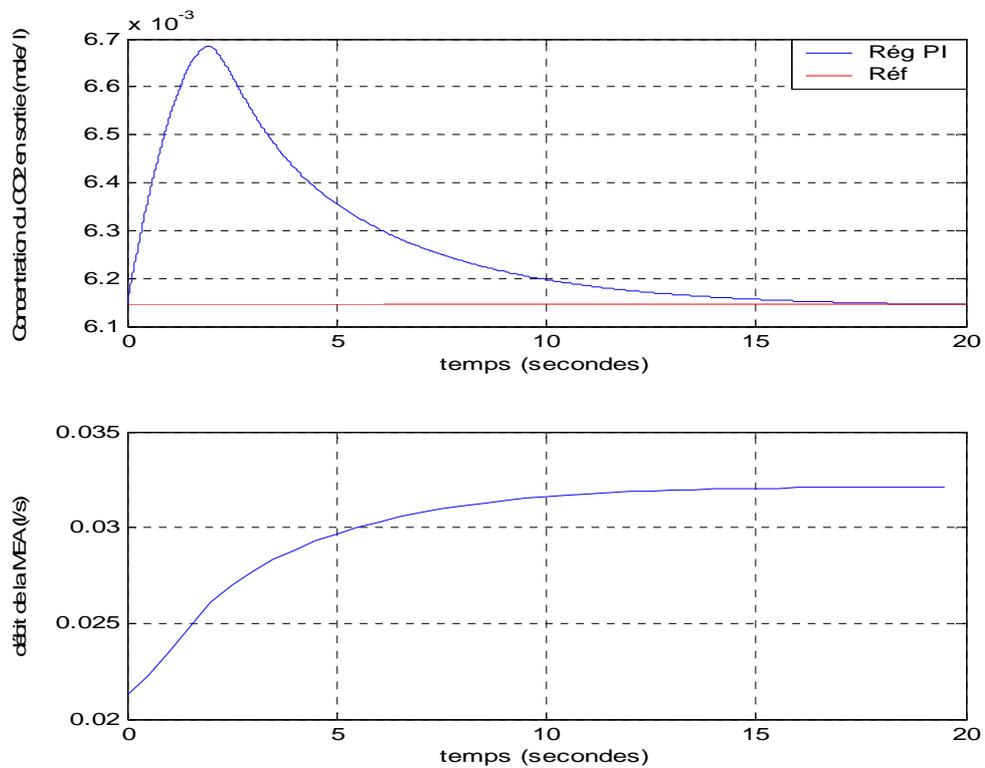


Figure I.26. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

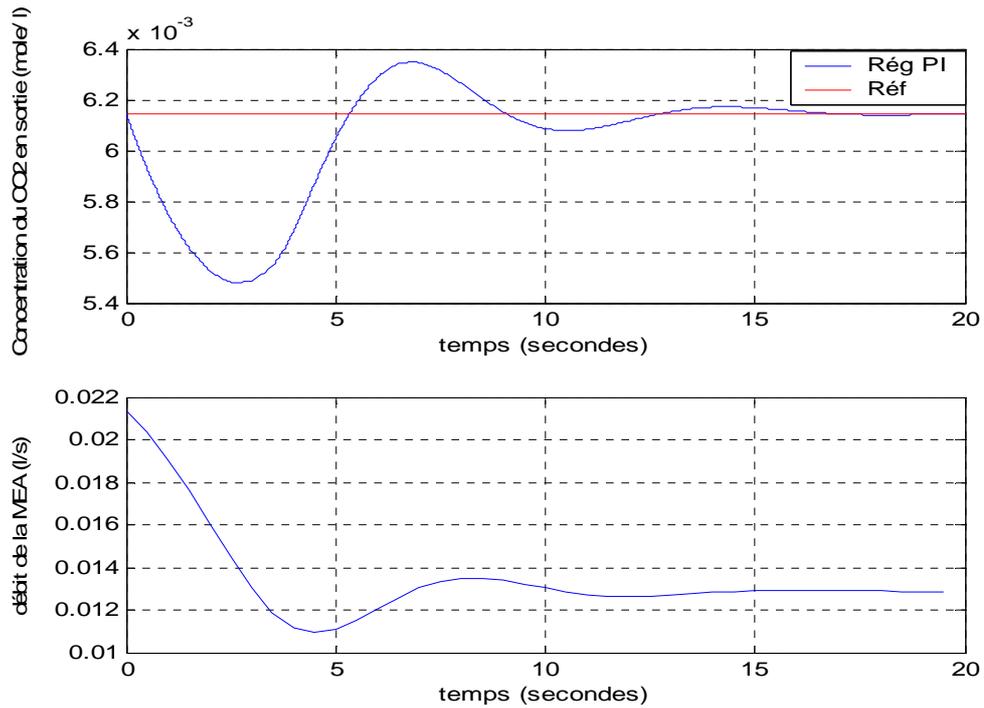


Figure I.27. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Variation de consigne

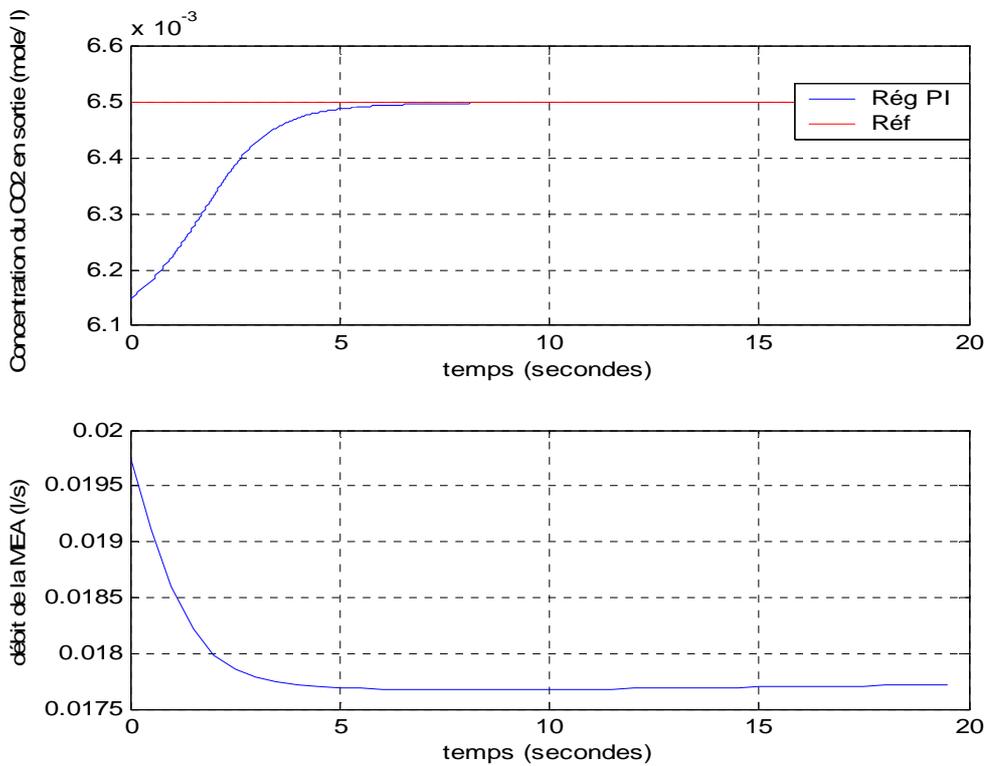


Figure I.28. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne 6.147×10^{-3} à 6.5×10^{-3}

Interprétation des résultats

En boucle ouverte

En appliquant une entrée échelon de perturbation sur la concentration ainsi que sur le débit de gaz en entrée, la concentration réglée à la sortie de la colonne augmente si le signe de l'échelon est positif, ou descend si le signe de l'échelon est négatif pour atteindre une valeur fixe.

Le système est donc stable et a une dynamique importante mais qui reste tout à fait normal pour un procédé chimique.

Le système présente un temps mort en réponse à un échelon de perturbation sur la concentration dû à la propagation du gaz le long de la colonne d'absorption.

On remarque sur les figures (I.4) et (I.10) que la dynamique du MEA est très lente par rapport à celle du CO₂ pour une perturbation de la concentration du CO₂ de +/-20%. Ce fait se retrouve sur les figures (I.5) et (I.11) où un échelon de perturbation sur C_{Be} fait varier la concentration de CO₂ en sortie avec la même dynamique, donc très lente. De plus, quand la concentration de C_{BE} varie en entrée, les variations de concentrations du CO₂ sont minimes (de 3.975 10⁻³ mole/l à 3.74 10⁻³ mole/l en pour le premier point de fonctionnement et de 6.147 10⁻³ mole/l à 5.69 10⁻³ mole/l pour le second point de fonctionnement). La différence très importante entre les constantes de temps du système pour une variation de la concentration de la MEA et celle de la concentration de CO₂ est due essentiellement à la différence d'ordre de grandeur des concentrations de MEA dans le liquide et de CO₂ dans le gaz.

Nous ne considérerons pas par la suite des échelons de perturbations sur la concentration de la MEA car sa dynamique est trop lente pour faire varier la concentration en gaz de manière significative.

En boucle fermée

Nous nous sommes intéressés à l'évolution de la concentration de CO₂ en haut de la colonne en fonction des perturbations intervenant sur la concentration de CO₂ en entrée de la colonne ainsi que sur le débit de gaz, nous avons également un changement imposé de consigne. Cette évolution est illustrée par les courbes ci-dessus.

Ces figures, montrent la robustesse de la régulation PI choisie pour les perturbations appliquées à notre système, que ce soit sur les concentrations, ou le débit de gaz, la poursuite est de même assurée pour les deux différents points de fonctionnement.

Le système présente en régulation un très net 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.

Les résultats obtenus en simulation sont satisfaisants, le régulateur PI prend en charge les perturbations sur les concentrations et le débit.

I.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons analysé en premier lieu le mode de fonctionnement de la colonne d’absorption, puis à partir des principes fondamentaux concernant le transfert de matière et des équations de bilan de matière, nous avons développé un modèle mathématique dynamique décrivant le processus d’absorption de CO_2 dans une colonne à garnissage opérant à contre courant. Le modèle obtenu est une équation non linéaire aux dérivées partielles. Il se distingue des modèles décrivant les processus d’absorption précédents par la prise en compte du cas d’une réaction du deuxième ordre, les relations décrivant le système ont pu être établies en considérant que $C_{BL}(x)$ n’était pas constante dans le film ni le long de la colonne.

En ce qui concerne la seconde partie, c’est-à-dire la simulation, après avoir effectué plusieurs essais, nous avons montré que le modèle développé précédemment décrivait correctement le système réel, et ceci en faisant une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et par simulation. Nous avons élargi la vérification en travaillant avec deux températures distinctes (25°C et 40°C).

Les simulations numériques de la réponse à un échelon de perturbation pour différentes amplitudes que ce soit sur les concentrations ou bien sur les débits et même en poursuite, nous ont permis d’étudier les différents aspects structurels de notre système ainsi que les propriétés de ce modèle. Une analyse du modèle ainsi simulé conduit aux conclusions suivantes :

- Le système est stable en boucle ouverte,
- Le système est non linéaire,
- Le système présente une dynamique très lente dans le cas de la variation de la concentration de la MEA,
- Le système présente un temps mort sur les perturbations en concentration dû à la propagation du gaz le long de la colonne d’absorption,

Les résultats obtenus en simulation en boucle fermée avec le régulateur PI sont satisfaisants, la sortie du système suit la référence, et ce pour différents types de perturbations.

Chapitre II :

Logique floue et Neuro-Floue

II.1. Introduction

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler. Cette difficulté découle généralement de la complexité du système dynamique dont il faut assurer la conduite, des non linéarités, d'une dimensionnalité élevée, des objectifs de contraintes et des objectifs de commande multiples et souvent contradictoires, des erreurs de modélisation, des bruits de mesure, etc. Il est donc difficile, voire impossible d'élaborer des modèles sous forme d'équations mathématique, et de ce fait, le calcul d'une loi de commande qui répond à nos objectifs devient de plus en plus difficile [TID99].

Pour faire face à ces difficultés, une alternative à la détermination explicite du modèle d'un système, est l'utilisation des systèmes flous, basés sur la notion d'ensembles flous ainsi que sur le raisonnement approximatif proche du raisonnement humain, avec l'apport de l'expertise de l'opérateur.

L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. En effet, elle a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate. Le point clef de cette stratégie réside donc dans l'utilisation du calcul symbolique pour l'élaboration de l'algorithme de commande. Cette méthodologie ouvre une nouvelle voie pour l'utilisation d'heuristique en remplaçant la modélisation du régulateur par une loi de commande basée sur des connaissances linguistiques acquises par un opérateur du procédé. La commande floue sert donc à représenter des connaissances incertaines et imprécises et à prendre une décision même si l'on ne peut estimer les entrées/sorties ou lorsque ces dernières sont entachées d'erreurs importantes.

On conçoit l'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation ou l'asservissement des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises, incertaines et parfois uniquement qualitatives, dans des boucles de régulation parfois incomplètes. Le savoir faire de l'opérateur, constitué souvent de règles simples, lui permet de conduire chaque machine plus correctement parfois qu'un algorithme classique.

Seulement, en contre partie des avantages qu'apporte la logique floue, nous nous heurtons au problème de synthèse des régulateurs flous qui nécessite des essais de simulation assez longs, en effet, des tâtonnements sont fréquemment indispensables, pour dimensionner correctement le contrôleur flou. Les recherches actuelles sont orientées vers l'association de la logique floue et des réseaux de neurones pour obtenir les conclusions des règles floues, on peut également utiliser les algorithmes génétiques. Cela permet d'introduire des capacités d'autorégulation et d'adaptation dans les systèmes flous.

Dans ce chapitre, nous exposerons en premier lieu les principales notions de logique floue et l'application de ces notions à la représentation des expressions linguistiques, ainsi que leur application dans la commande. Après une brève introduction aux réseaux de neurones, nous nous intéresserons à la combinaison logique floue- réseaux de neurones. Nous présenterons la stratégie de commande utilisée lors de notre application. Pour terminer, nous aborderons quelques propriétés structurelles des systèmes flous (Représentation entrées/sorties floue, décomposition du système flou global en sous systèmes élémentaires ainsi que les systèmes flous affines en une entrée,...) et cela afin d'introduire la linéarisation entrée-sortie discrète floue ou L.E.S.D.F.

II. 2. Bref historique de la logique floue

Les prémisses de la logique floue sont apparues dans les années 1940, avec les premières approches par des chercheurs américains du concept d'incertitude.

En 1965, Zadeh [ZAD65] publie le premier article concernant une nouvelle méthode pour décrire les incertitudes non- probabilistiques, ce qu'il appellera les ensembles flous [JAN95]. Dans cette méthode, il établit le lien entre les ensembles flous et la modélisation non- probabilistiques de l'incertitude grâce à la théorie des possibilités dans laquelle les ensembles flous servent à représenter les idées de valeur incomplètement spécifiées, mal connues. Ensemble flou et théorie de possibilité sont à la base d'une méthodologie de représentation et d'utilisation de connaissances imprécises, vagues, et incertaines que Zadeh appelle théorie de raisonnement approché [TID99].

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F.L.Smidt-Fuller [LAN92]. Grâce au chercheur japonais M. Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985.

La logique floue trouve ses origines dans un certain nombre de constatations :

- La connaissance que l'être humain a d'une situation quelconque est généralement imparfaite, elle peut être incertaine (il doute de sa validité), ou imprécise (il a du mal à l'exprimer clairement).
- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives.
- Dans l'industrie ou les techniques, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système.
- Plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables.

II.2.1. Intérêt et utilisation de la logique floue pour le contrôle

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle-commande de procédés, appelé couramment « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes et une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci.

Les bases de règles floues sont intéressantes en commande car elles permettent de :

- Formaliser et simuler l'expertise d'un opérateur ou d'un concepteur dans la conduite et le réglage d'un procédé.
- Donner une réponse simple pour les procédés dont la modélisation est difficile.
- D'améliorer le fonctionnement de contrôleurs classiques par l'autorégulation.
- Prendre en compte plusieurs variables et effectuer de la « fusion pondérée » des grandeurs d'influence.

II.3. Principes de la logique floue

Les grandeurs utilisées dans un système de réglages sont généralement générées par des capteurs. Il est nécessaire de convertir ces grandeurs en variables floues. Pour ce faire on définit les trois notions suivantes :

- Les variables floues, qui permettent de décrire les variables de façon naturelle
- Les ensembles flous qui caractérisent les variables floues
- Les fonctions d'appartenance qui permettent de définir le degré de vérité de la variable floue en fonction de la valeur de la grandeur d'entrée.

II.3.1. Variables linguistiques

C'est une variable dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou phrases exprimés en langage naturel [WAN94, MEN95, PAS98]. La raison pour laquelle on utilise cette représentation, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique.

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplet $t \{x, T(x), X\}$ où x désigne le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble de termes ou valeurs linguistiques qui sont utilisées pour caractériser x , et X son univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numériques sur lesquelles x est défini.

Par exemple, si l'erreur est considérée comme variable linguistique définie dans le domaine $X = [-10; 10]$, ses valeurs linguistiques peuvent être définies comme suit:

$T(\text{erreur}) = \{\text{Négatif grand}, \text{Négatif moyen}, \text{Environ zéro}, \text{Positif moyen}, \text{Positif grand}\}$.

Symbole	Signification
NG	Négatif grand
NM	Négatif moyen
EZ	Environ zéro
PM	Positif moyen
PG	Positif grand

Tableau II.1. Intervalles flous

Ces valeurs linguistiques peuvent être considérées comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées en Figure II.3.

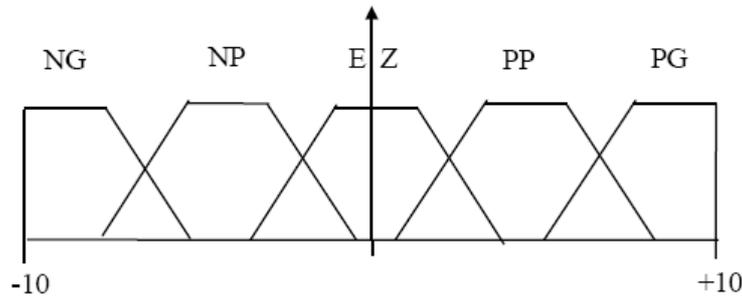


Figure II.1. Fonction d'appartenance pour T (erreur)

II.3.2. Ensembles flous

La logique floue peut être vue comme une extension de la logique booléenne. De plus, elle permet de traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel. [LAB05]

Ensemble net

Un ensemble, est une collection d'objets. La description d'un ensemble net A sur un référentiel U (dit aussi univers de discours) consiste en un énoncé des éléments qui appartiennent à cet ensemble, chaque élément u de U appartient à 100% à A , ou n'appartient pas à 100% à A [LAB98]. Ceci peut être mieux décrit par une fonction caractéristique donnée par :

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & u \in A \\ 0 & u \notin A \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Ensemble flou

La notion d'ensemble flou provient du constat que « très souvent les classes d'objets rencontrés dans le monde physique ne possèdent pas de critères d'appartenance bien définis » [MEN95]. Mathématiquement, un ensemble flou A est défini sur un référentiel U , par une fonction d'appartenance notée μ_A , qui appliquée à un élément u de U , retourne un degré d'appartenance $\mu_A(u)$ de u à A . Un ensemble flou, peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées $A = \{(u, \mu_A(u)) / u \in U\}$

Si U est discret, A est représenté par : $A = \sum_{u_i \in U} \mu(u_i) / u_i$ (II.2)

Si U est discret, A est représenté par : $A = \int_U \mu(u) / u$ (II.3)

Les ensembles flous ont le grand avantage de constituer une représentation mathématique des termes linguistiques largement utilisés dans l'expression de connaissance expertes, qualitatives et qui sont manipulées par la logique floue. [LAB98]

II.3.3. Fonctions d'appartenance

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante. On parle de fuzzification.

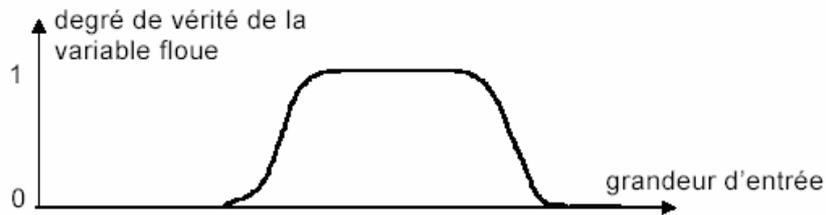


Figure II.2. Fonction d'appartenance

On peut évidemment choisir n'importe quelle forme pour les fonctions d'appartenance. Cependant, en pratique, pour des raisons de simplicité, les fonctions d'appartenance ci-dessous sont les plus souvent utilisées [JAN93, BUH94, WAN94, JAN95, LAB98]:

- *Fonction triangulaire* : Elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$, qui déterminent les coordonnées des trois sommets :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.4})$$

- *Fonction trapézoïdale* : Elle est définie par quatre paramètres :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (\text{II.5})$$

- *Fonction gaussienne* : Elle est définie par deux paramètres :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{II.6})$$

- *Fonction sigmoïdale* : Elle est définie par deux paramètres :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \quad (\text{II.7})$$

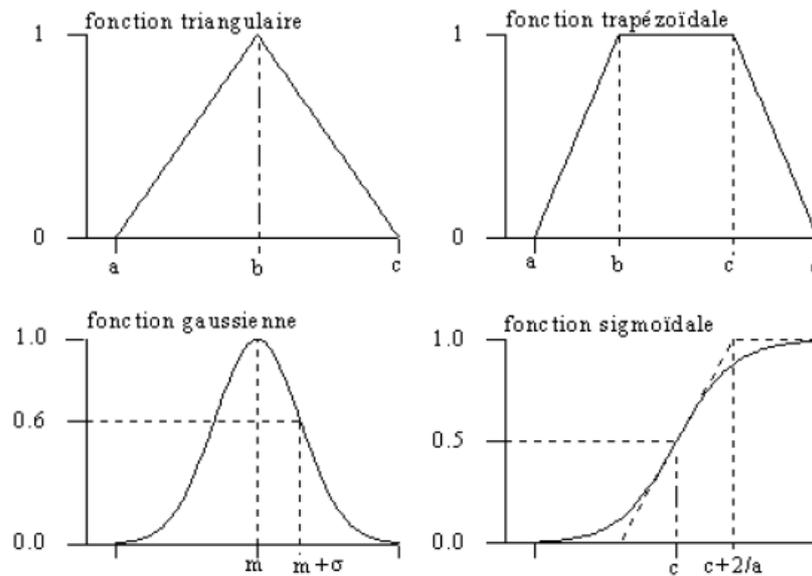


Figure II.3. Formes des fonctions d'appartenance usuelles

II.3.4. Opérations sur les ensembles flous

Disposant d'une représentation formelle de classes floues sous la forme de fonctions d'appartenance, il est naturel de chercher à faire avec les ensembles flous ce que l'on fait avec les ensembles classiques. Zadeh a ainsi généralisé les opérateurs des ensembles classiques au cas flou [LAB98].

Les opérateurs appliqués aux ensembles flous sont définis à partir de leurs fonctions d'appartenance.

Soient A et B deux ensembles flous définis dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B respectivement.

Définition 1 : *Union (Disjonction)* : La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ de l'union $A \cup B$, ou A OR B, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \dot{+} \mu_B(u) \quad (\text{II.8})$$

Le symbole « $\dot{+}$ » représente la co-norme triangulaire [LEE90]. la co-norme triangulaire la plus utilisée dans le domaine de la commande est la fonction max :

$$\mu_A(u) \dot{+} \mu_B(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (\text{II.9})$$

Définition 2 : *Intersection (Conjonction)* : La fonction d'appartenance $\mu_{A \cap B}$ de l'intersection $A \cap B$, ou A AND B, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) * \mu_B(u) \quad (\text{II.10})$$

Le symbole « * » représente la norme triangulaire [LEE90]. Deux normes triangulaires sont le plus souvent utilisées pour évaluer l'intersection floue :

$$\text{Min :} \quad \mu_A(u) * \mu_B(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Produit algébrique :} \quad \mu_A(u) * \mu_B(u) = \mu_A(u) \times \mu_B(u) \quad (\text{II.12})$$

Définition3 : *Complémentation :* La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément de l'ensemble A ; notée \bar{A} ou NOT A, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (\text{II.13})$$

Définition 4 : *Produit cartésien :* Soient A_1, A_2, \dots, A_n des ensembles flous respectivement définis sur les Univers de discours U_1, U_2, \dots, U_n , le produit cartésien de A_1, A_2, \dots, A_n est un ensemble flou défini sur $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, \dots, u_n) = \mu_{A_1}(u_1) * \dots * \mu_{A_n}(u_n) \quad (\text{II.14})$$

II.3.5. Implication floue

L'implication floue est un opérateur qui permet d'évaluer le degré de vérité d'une règle R de la forme 'Si x est A alors y est B' à partir des valeurs de la prémisse x d'une part, et de celle de la conclusion y d'autre part.

$$\mu_R(x, y) = \text{Im } p(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{II.16})$$

Les implications les plus utilisées en commande floue sont celles de Mandani et de Larsen :

$$\bullet \text{ Implication de Mandani : } \mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{II.17})$$

$$\bullet \text{ Implication de Larsen : } \mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (\text{II.18})$$

II.4. Structure d'un système flou

Un système flou peut être interprété selon deux points de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données d'entrée à un vecteur de sortie et, de point de vue logique, un système flou est un système de prise de décisions, à base de connaissances particulières composé de quatre modules principaux, à savoir : la base de règles, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification [BUH94, WAN94, JAN95, MEN95, HEN97, LAB05] :

La mise en oeuvre d'une commande floue fait apparaître quatre grands modules.

•Le premier module traite les entrées du système (valeurs réglantes). On définit tout d'abord un univers de discours, un partitionnement de cet univers en classes pour chaque entrée, et des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées. La première étape, appelée fuzzification, consiste à attribuer à la valeur numérique de chaque entrée au temps t sa

fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou.

- Le second module, base des règles floues ou base de connaissance, contient les règles floues décrivant le comportement du système ; elle est le cœur du système dans le sens où grâce à ces règles on peut passer des grandeurs d'entrées aux grandeurs de sortie.

- Le troisième module consiste en l'application de règles de type «Si- Alors». Ces règles vont permettre de passer d'un degré d'appartenance d'une grandeur d'entrée ou réglante au degré d'appartenance d'une grandeur de sortie ou commande.

- Le quatrième et dernier module décrit l'étape de défuzzification qui est la transformation inverse de la première. Il permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la détermination de la valeur à donner à cette commande.

Le schéma de commande est donné par la figure II.4

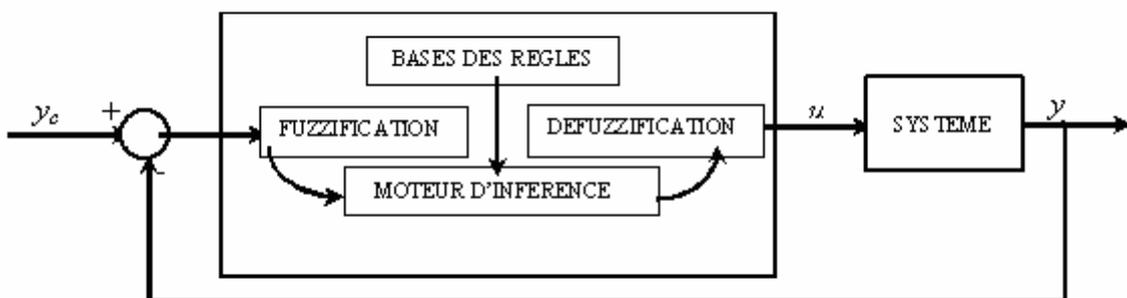


Figure II.4. Schéma de commande par logique floue

Plusieurs stratégies de défuzzification sont utilisées:

- *Méthode du maximum :*

La commande est égale à la valeur dont le degré d'appartenance est le plus fort.

- *Méthode de la moyenne des maximas :*

La commande sera égale à la moyenne des valeurs dont le degré d'appartenance est maximal.

- *Méthode du centre de gravité :*

C'est la méthode la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Dans celle-ci la commande sera égale au centre de gravité de l'ensemble flou de sortie, on obtient donc pour :

*Univers de discours discret :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad (\text{II.19})$$

*Univers de discours continu :

$$C = \frac{\int x \cdot \mu_A dx}{\int_x \mu_A dx} \quad (\text{II.20})$$

II.4.1. Types de régulateurs flous [LAB98]

Type 1 : régulateur flou de type Mamdani : Dans ce type, les conclusions sont symboliques ou linguistiques et le calcul de la sortie nécessite l'utilisation d'une méthode de défuzzification.

Type 2 : régulateur flou de type Sugeno : Ici, il n'y a pas de défuzzification. En effet la conclusion de chaque règle est égale à une constante ou à une forme polynomiale plus générale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue.

Type 3 : régulateur flou de type Tsukamoto : Dans ce cas, les sorties sont des fonctions monotoniques des variables d'entrées. La sortie totale est une moyenne pondérée des degrés de confiances de chaque règle floue et des valeurs des fonctions des variables de sortie.

II.4.2. Synthèse des régulateurs flous

La synthèse des régulateurs flous passe par les étapes suivantes : [ILT06]

- Choix des variables d'entrée et des variables de sortie du régulateur.
- Détermination de la plage de variation de chaque variable d'entrée et chaque variable de sortie
- Construction de sous-ensembles flous dans chaque plage.
- Choix des fonctions d'appartenance associées aux sous-ensembles flous.
- Construction de la base de règles.
- Choix des méthodes d'inférence, et de défuzzification.

Si nécessaire, on peut faire une normalisation des plages de variation des variables d'entrées ou de sorties.

II.5. Les réseaux de neurones

II.5.1. Définition [HER94]

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

Les neurones formels : Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie".

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique qui calcule une sortie à partir des entrées.

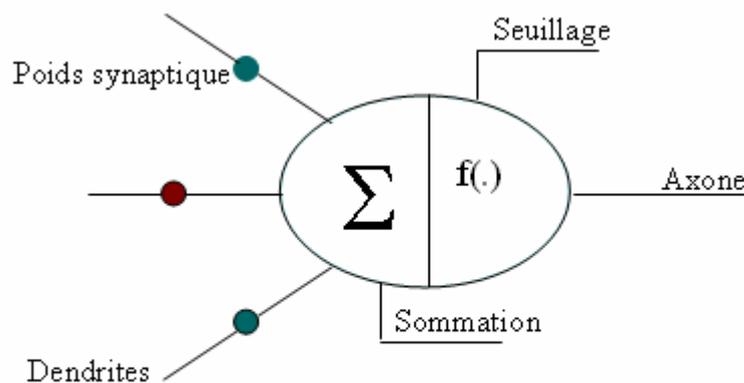


Figure II.5. Neurone formel

Le neurone formel est modélisé par deux opérateurs comme le montre la (figure II.6), un opérateur de sommation en entrée, suivi d'un opérateur non linéaire. C'est l'association de tels éléments simples sous la forme de *réseaux* qui permet de réaliser des fonctions utiles pour des applications industrielles.

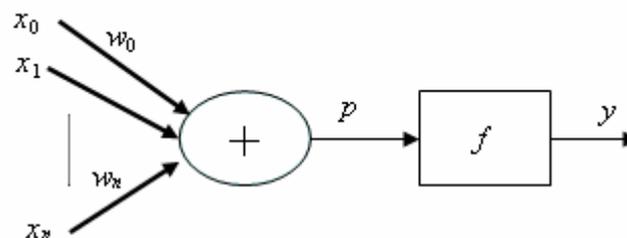


Figure II.6 : Modèle formel d'un neurone

La première action du neurone est l'activation du potentiel somatique p , elle consiste à calculer une somme des entrées x_i pondérées respectivement par les poids w_i , à laquelle s'ajoute un terme constant ou « biais ». La sortie du neurone est alors donnée par une fonction non linéaire $y=f(p)$.

$$p = \sum_{i=1}^k w_i x_i + w_0 \quad (\text{II.21})$$

Avec :

p : Potentiel somatique

w_0 : Biais

x_i : Entrée du neurone i

w_i : Poids synaptiques

II.5.2. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage des réseaux de neurones consiste à calculer les poids synaptiques de telle manière que la sortie du réseau de neurones soit aussi proche que possible de la sortie souhaitée du processus à commander. La plupart des algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones formels sont des algorithmes d'optimisation : ils cherchent à minimiser, par des méthodes d'optimisation une fonction de coût qui constitue une mesure de l'écart entre les réponses réelles de réseau et ses réponses désirées. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en fonction du gradient de la fonction coût : le gradient est estimé par une méthode spécifique aux réseaux de neurones, dite méthode de *retropropagation*. Les poids sont initialisés aléatoirement avant l'apprentissage, puis modifiés itérativement jusqu'à obtention de résultats satisfaisants.

II. 6. Contrôleur neuro-flou

Dans cette stratégie, l'implémentation de l'algorithme de commande du contrôleur neuro-flou comporte les mêmes étapes que celui du contrôleur flou, la différence réside dans l'utilisation des RNA pour la fuzzification- défuzzification et les règles d'inférence. Pour cela on utilise deux méthodes :

- Méthode explicite : elle utilise pour chaque étape un réseau de neurones.
- Méthode implicite : elle utilise un même réseau englobant les trois étapes.

L'esprit de la méthode implicite est d'intégrer une connaissance, a priori, même imparfaite, mais permettant un apprentissage plus rapide qu'avec des poids initiaux aléatoires. Ce réseau est constitué de 4 couches (figures II.7). Avec p entrées et une sortie;

Par exemple pour deux entrées (x_1, x_2) on a le contrôleur neuro-flou suivant:

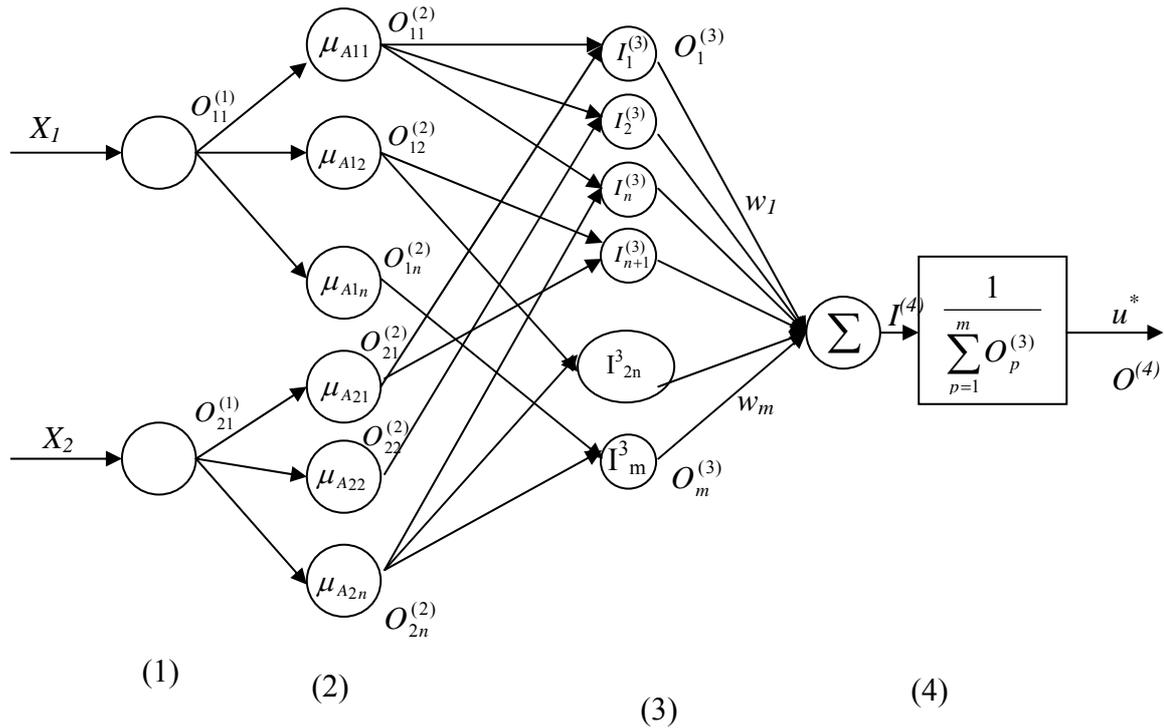


Figure II.7. Structure du contrôleur neuro-flou

La couche 1 : couche d'entrée

Les entrées de cette couche sont les valeurs normalisées de l'erreur $e(k)$ et de la dérivée de l'erreur de la sortie du système $de(k)$. Les neurones de cette couche ne font que transmettre les valeurs des entrées vers la deuxième couche.

L'unité d'entrée : $I_i^{(1)} = x_i, \quad i = 1,2 \tag{II.22.a}$

L'unité de sortie : $O_{ij}^{(1)} = I_i^{(1)}, \quad i = 1,2; \quad j = 1,2,\dots,n \tag{II.22.b}$

La couche 2 : couche de fuzzification

Cette couche reçoit, les signaux de la couche d'entrée et utilise des fonctions gaussiennes comme fonctions d'appartenance pour déterminer la contribution relative du signal observé. La relation entrée/sortie de cette couche est définie comme suit :

L'unité d'entrée : $I_{ij}^{(2)} = -\frac{(O_{ij}^{(1)} - a_{ij})^2}{b_{ij}^2}, \quad i = 1,2; \quad j = 1,2,\dots,n \tag{II.23.a}$

L'unité de sortie : $O_{ij}^{(2)} = \exp(I_{ij}^{(2)}), \quad i = 1,2; \quad j = 1,2,\dots,n \tag{II.23.b}$

Où a_{ij} et b_{ij} sont les paramètres des fonctions gaussiennes.

La couche 3 : couche des règles

C'est la couche qui calcule le degré d'activation de chaque règle. On a donc :

$$\text{L'unité d'entrée : } I_{(j-1)n+l}^{(3)} = O_{1j}^{(2)} \cdot O_{2l}^{(2)}, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.24.a})$$

$$\text{L'unité de sortie : } O_i^{(3)} = I_i^{(3)}, i = 1, 2, \dots, m = n^2 \quad (\text{II.24.b})$$

La sortie est le produit de la fonction d'activation pondérée par la conclusion de la règle.

La couche 4 : couche de sortie : Elle effectue l'agrégation de la base de règles.

$$\text{Unité d'entrée : } I^{(4)} = \sum_{p=1}^m O_p^{(3)} \cdot w_p \quad (\text{II.25.a})$$

$$\text{Unité de sortie : } O^{(4)} = u^* = \frac{I^{(4)}}{\sum_{p=1}^m O_p^{(3)}} \quad (\text{II.25.b})$$

Où u^* est la variation de la commande.

II.6.1. Apprentissage du contrôleur neuro-flou

Une fois que le régulateur neuro-flou est connecté, le but de l'apprentissage sera d'optimiser les valeurs des paramètres des fonctions d'appartenance a_{ij} et b_{ij} , ainsi que les poids w_i (qui sont les valeurs des conclusions).

L'apprentissage est assuré par la méthode de rétro propagation qui peut entraîner une divergence si on fait un mauvais choix des valeurs initiales. Pour éviter ce problème, les valeurs initiales des paramètres a_{ij} et b_{ij} ; sont choisis de telle manière à recouvrir uniformément l'univers de discours normalisé $[-1,1]$. Les poids w_i sont fixés initialement à des valeurs empiriques données par l'expert ou par les données du processus. Dans le cas où les connaissances de l'expert et/ou les informations sur le processus sont incomplètes ou insignifiantes on peut initialiser ces poids aléatoirement.

Après l'initialisation, l'algorithme de rétro propagation est utilisé pour ajuster les paramètres du contrôleur neuro-flou. Le critère à minimiser est :

$$E = \frac{1}{2} (y - y_d)^2 \quad (\text{II.26})$$

Les paramètres du régulateur sont ajustés par:

$$w_v(k+1) = w_v(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_v}, v = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II.27})$$

$$a_{ij}(k+1) = a_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial a_{ij}}, i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.28})$$

$$b_{ij}(k+1) = b_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial b_{ij}}, i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{II.29})$$

Le terme $\frac{\partial E}{\partial w_v}$ est donné par

$$\frac{\partial E}{\partial w_v} = \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u^*} \frac{\partial u^*}{\partial w_v} = (y - y_d) \frac{\partial y}{\partial u^*} \frac{O_v^{(3)}}{\sum_{p=1}^m O_p^{(3)}} \quad (\text{II.30})$$

L'équation précédente donne un moyen d'optimiser les conclusions du régulateur neuro-flou, à supposer que l'on connaisse la dérivée partielle $\frac{\partial y}{\partial u^*}$, ce qui, en général, n'est pas le cas.

Une simplification intéressante est possible, quand on connaît le sens de variation de la dérivée: il suffit alors de remplacer la dérivée par son signe, ± 1 . Cette approximation n'est valable que localement, ou dans un domaine restreint.

II.7. Propriétés structurelles des systèmes flous

Dans cette partie du chapitre, nous nous intéresserons à la représentation floue des systèmes non linéaires discrets, un modèle entrée-sortie est privilégié au modèle d'état, à cause de l'intérêt majeur qu'il présente dans les problèmes d'identification et de commande flous. D'une part, ils présentent une structure beaucoup plus simple qu'un modèle d'état et d'autre part, ils déterminent une relation directe entre la commande et la sortie. Cette dernière permet la construction d'un système inverse et ainsi la résolution du problème de commande à condition que le système soit à phase minimale. [BOU00]

II.7.1. Représentation entrée-sortie floue

L'hypothèse d'affinité en la commande du système qui est une hypothèse fréquente pour des systèmes non linéaires continus est très souvent non valable dans un cadre discret. En effet, la représentation discrète d'un système continu affine en la commande ne conduit pas toujours à un système discret affine en la commande. [BOU00]. Pour pouvoir contourner cette difficulté, une représentation E/S floue adéquate a été choisie.

Le but de ce paragraphe est de trouver une relation directe entre l'entrée et la sortie pour tout système non linéaire discret qui peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$y(k+1) = \psi_d[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \quad (\text{II.31})$$

Avec $m \leq n$

Pour chaque $y(k-p+1)$ et $u(k-q+1)$, on définit n_p et m_q fonctions d'appartenance A_p^{ip} et B_q^{jq} , $p=1, \dots, n$ et $q=1, \dots, m$ définies sur les univers de discours $I_1, \dots, I_n, J_1, \dots, J_m$
Et : $\phi_{fd}(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)$ est une constante réelle associée à la conclusion de la règle indexée $(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)$

La fonction non linéaire ψ_d donnée par (II.31) est représentée par un système flou de Takagi-Sugeno à conclusion constante dont la base de règles est définie sur $I = I_1 \times \dots \times I_n \times J_1 \times \dots \times J_m$ par une collection de règles de la forme :

$$\begin{aligned}
 & R^{(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)} : \\
 & \text{Si } y(k) \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } \dots \text{ et } y(k-n+1) \text{ est } A_n^{i_n} \\
 & \text{et } u(k) \text{ est } B_1^{j_1} \text{ et } \dots \text{ et } u(k-m+1) \text{ est } B_m^{j_m} \\
 & \text{Alors } y_f(k+1) = \phi_{fd}(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)
 \end{aligned} \tag{II.32}$$

Supposons n_p et m_q valeurs linguistiques définies sur les univers de discours pour chaque $y(k-p+1)$ et $u(k-q+1)$, dans ce cas, la base de règles complète est composée de $s = \prod_{p=1}^n n_p \prod_{q=1}^m m_q$ règles floues,

L'ensemble des indices i_p et j_q est donné par :

$$i_p = \{1, \dots, n_p\}; p = 1, \dots, n \quad \text{et} \quad j_q = \{1, \dots, m_q\}; q = 1, \dots, m$$

Pour une entrée $Z(k) = [y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-m+1)] \in R^{n+m}$, la sortie générée par le système flou est donnée par :

$$y_f(k+1) = \sum_{(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m) \in I} \xi^{(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)}(Z) \cdot \phi(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m) = \xi^T(Z) \cdot \phi_{fd} \tag{II.33}$$

Où : $\xi(Z)$ est le vecteur correspondant aux degrés de validité des prémisses de règles et ϕ_{fd} est le vecteur correspondant aux conclusions des règles

Si ψ_{fd} représente l'approximation floue optimale de ψ_d , l'équation (II.31) peut être réécrite comme suit :

$$y(k+1) = \psi_{fd}[Z(k)] + \Delta = \xi^T(Z) \cdot \phi_{fd} + \Delta \tag{II.34}$$

Où Δ représente l'erreur globale, somme des erreurs de modélisation et d'identification.

II.7.2. Objectif de commande

Comme il a été signalé dans le paragraphe précédent, la représentation adoptée est de type entrée-sortie. Ce choix a pour objectif de faciliter la conception des lois de commande puisque seules les représentations entrées-sorties présentent une relation directe entre la sortie et la commande. [BOU00]

La commande des procédés non linéaires peut être vue sous différentes facettes. On distingue classiquement les problèmes de stabilisation, de régulation, de suivi d'une trajectoire générée par un modèle de référence, ou encore de suivi d'une trajectoire générale. [BOU00]. Dans notre étude, nous nous intéressons au problème de régulation.

II.7.2.1. Synthèse de la loi de commande par inversion du système

Intuitivement, un système placé en cascade avec son inverse, comme le montre la figure II.8, délivre une relation d'identité entre la sortie du système et l'entrée de son inverse, sous couvert de respect de la causalité et de l'hypothèse de à phase minimale sur le système.

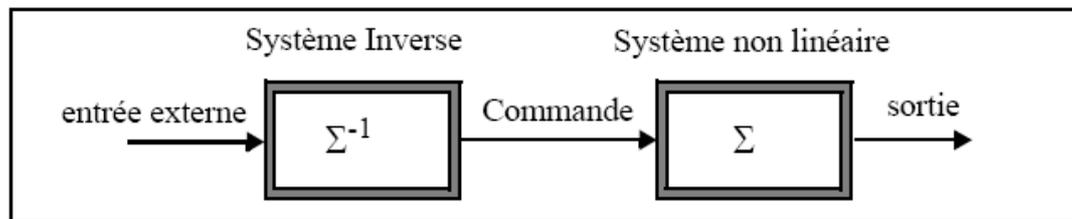


Figure II.8. Inversion en boucle ouverte

Afin de répondre à nos objectifs de commande, nous supposons qu'il existe un système inverse capable en présence de la trajectoire désirée, de fournir une entrée (commande) qui, appliquée au système, conduit à une convergence de sa sortie vers la valeur désirée. Dans ce cas, la synthèse d'un contrôleur est ramenée à un problème de construction d'un système inverse. [BOU00], toujours à condition que le système soit à phase minimale.

Si l'on utilise une représentation d'état des systèmes dynamiques, une inversion directe ne peut pas être envisagée, car la sortie de ces systèmes ne dépend pas explicitement de l'entrée (commande). Par contre, cette inversion est possible si une représentation entrée-sortie est adoptée. Cette propriété présente une autre motivation pour utiliser la représentation entrée-sortie. [BOU00],[FRA74], [TOM87],[SAA96],[SAI96].

Afin de pouvoir synthétiser un contrôleur flou capable de répondre à nos objectifs de commande, une représentation floue incertaine de la dynamique du système non linéaire sera adoptée et dans ce cas, le contrôleur flou sera choisi comme l'inverse du modèle flou nominal. [BOU00]

II.7.2.2. Identification du modèle flou [BOU00]

Nous avons constaté précédemment que le problème de régulation peut être abordé par inversion d'un modèle flou. Reste à développer des méthodes d'identification capables de fournir, à partir de données mesurées sur le système, la base de règles décrivant le système flou considéré. Cette opération correspond à un problème d'identification.

D'une manière générale, le problème d'identification floue consiste à choisir une forme de règles floues appropriée puis à concevoir des lois d'ajustement de paramètres ou de structure afin que, pour une entrée donnée, la sortie du modèle flou obtenu approche la sortie du procédé de manière satisfaisante.

La procédure d'identification des modèles flous de Takagi-Sugeno à conclusion constante peut être décomposée en une première phase d'identification des structures (nombre de symboles flous et leur répartition sur les univers de discours des entrées) suivie d'une seconde d'identification des paramètres, ici la conclusion numérique des règles floues. L'identification

de paramètres suppose une structure de base de règles figées. Dans ce cas, et comme pour les systèmes linéaires, on aura à identifier des systèmes linéaires en paramètres.

Remarque sur les fonctions triangulaires :

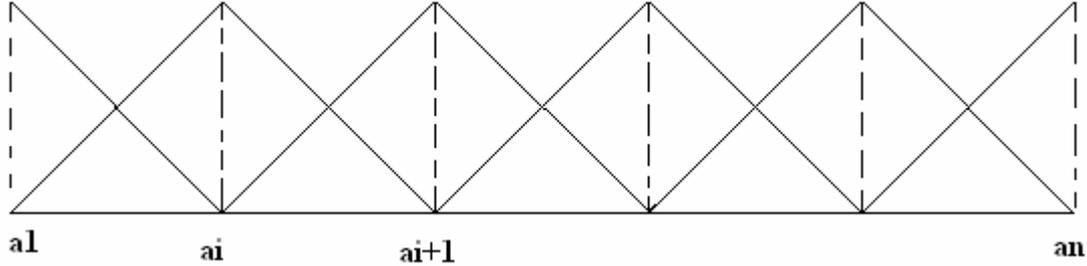


Figure II.9. Intervalles flous

Cas d'une seule entrée :

Pour n règles floues, (n fonctions triangulaires), nous avons ($n-1$) intervalles, et dans chaque intervalle, il n'y a que deux règles qui sont activées à la fois.

Si on suppose que les conclusions des règles sont du type Takagi- Sugeno, alors on a sur l'intervalle $[a_i, a_{i+1}]$:

$$y = \phi_i \mu_{a_i}(x) + \phi_{i+1} \mu_{a_{i+1}}(x) \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mu_{a_i}(x) &= \frac{a_{i+1} - x}{a_{i+1} - a_i} \\ \mu_{a_{i+1}}(x) &= 1 - \mu_{a_i}(x) \end{aligned} \quad (\text{II.36})$$

En remplaçant (II.36) dans (II.35), on trouve :

$$y = \frac{\phi_i a_{i+1} - \phi_{i+1} a_i}{a_{i+1} - a_i} + \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{a_{i+1} - a_i} x \quad (\text{II.37})$$

Ce qui montre que y est affine en x

II.7.3. Propriétés du système flou à deux entrées

Pour deux entrées e_1, e_2 , avec n_1 fonctions d'appartenance pour e_1 et n_2 pour e_2 , le système flou de Takagi-Sugeno est donné par une collection de règles sous la forme :

$$R^{(i_1, i_2)} : \text{Si } e_1 \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } e_2 \text{ est } A_2^{i_2} \text{ Alors } s = \phi(i_1, i_2) \quad (\text{II.38})$$

La sortie générée par ce système est donnée par :

$$s = \sum_{(i_1, i_2)} \xi^{(i_1, i_2)}(e) \phi(i_1, i_2) \quad \text{avec : } e = [e_1, e_2] \quad (\text{II.39})$$

Le système donné par (II.38) est défini sur l'univers de discours E^2 donné par :

$$E^2 = E_1 \times E_2 = [\alpha_1^{e_1}, \beta_1^{e_1}] \times [\alpha_2^{e_2}, \beta_2^{e_2}] \quad (\text{II.40})$$

$\alpha_p^{ep}, \beta_p^{ep}$; $p=1, 2$, sont respectivement la valeur minimale et maximale de l'intervalle définissant l'univers de discours E_p

Les deux univers de discours peuvent être décomposés comme suit :

$$E_1 = [\alpha_1^{e_1}, \beta_1^{e_1}] = \bigcup_{i_1=1}^{n_1-1} [a_1^{i_1}, a_1^{i_1+1}]; \quad (\text{II.41})$$

$$E_2 = [\alpha_2^{e_2}, \beta_2^{e_2}] = \bigcup_{i_2=1}^{n_2-1} [a_2^{i_2}, a_2^{i_2+1}];$$

Où a_p^{ip} est la valeur modale du système flou A_p^{ip} vérifiant :

$$\mu_{A_1^{i_1}}(a_1^{i_1}) = \mu_{A_2^{i_2}}(a_2^{i_2}) = 1 \quad (\text{II.42})$$

La décomposition des deux univers de discours conduit à mettre en évidence un domaine rectangulaire encadré par 4 nœuds que l'on appellera maille floue élémentaire notée $E_{(i_1, i_2)}^2$ t.q. $E_{(i_1, i_2)}^2 = [a_1^{i_1}, a_1^{i_1+1}] \times [a_2^{i_2}, a_2^{i_2+1}]$; $p = 1, 2$; $i_p = 1, \dots, n_p - 1$. (figure II.10).

Dans ce cas, l'univers de discours global E est l'union des différentes mailles le composant au nombre de $(n_1 - 1) \times (n_2 - 1)$ sous systèmes flous, chaque sous système étant défini par une collection de 4 règles. Les règles floues activées pour chaque maille $E_{(i_1, i_2)}^2$ sont $(i_1, i_2), (i_1 + 1, i_2), (i_1, i_2 + 1), (i_1 + 1, i_2 + 1)$.

Soit $IS = \{(v_1, v_2) / v_1 \in \{0, 1\}, v_2 \in \{0, 1\}\}$, alors les 4 règles peuvent s'écrire : $(i_1 + v_1, i_2 + v_2), v_1 \in \{0, 1\}, v_2 \in \{0, 1\}$

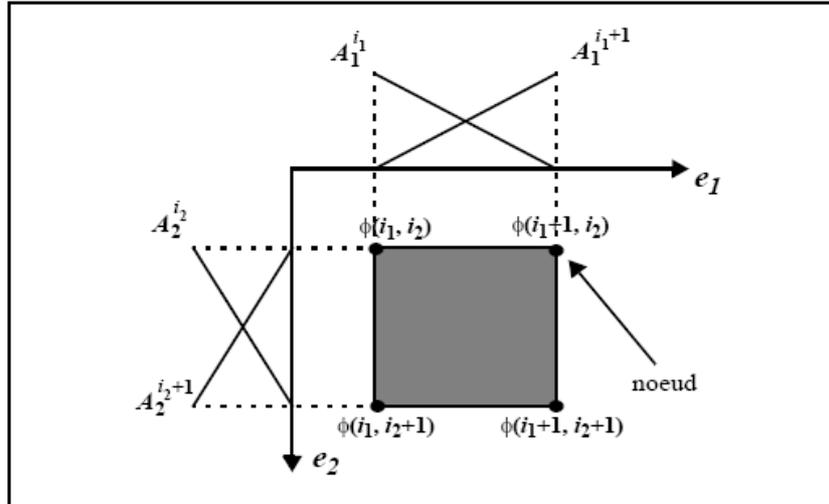


Figure II.10. Maille floue élémentaire

La sortie de chaque sous système est donné par :

$$R_{(i_1, i_2)}^{(\nu_1, \nu_2)} : \text{Si } e_1 \text{ est } A_1^{i_1 + \nu_1} \text{ et } e_2 \text{ est } A_2^{i_2 + \nu_2} \text{ Alors } s_{(i_1, i_2)} = \phi(i_1 + \nu_1, i_2 + \nu_2) \quad (\text{II.43})$$

Avec : $p = 1, 2, \nu_p \in \{0, 1\}$

Où (ν_1, ν_2) indice une règle particulière de ce système.

Pour une entrée e appartenant à la maille $E_{(i_1, i_2)}^2$, la sortie générée par le sous système flou est donnée par :

$$s_{(i_1, i_2)} = \sum_{(\nu_1, \nu_2) \in \{0, 1\}} \xi^{(i_1 + \nu_1, i_2 + \nu_2)} \phi(i_1 + \nu_1, i_2 + \nu_2) \quad (\text{II.44})$$

Remarque 1:

A chaque instant, pour une entrée e quelconque, on remarque que la sortie du système global (II.39) est égale à la sortie générée par le sous système de la forme (II.43) défini sur la maille à laquelle appartient e .

Remarque 2:

En développant l'équation (II.44) par rapport à ν_2 , la sortie du sous système flou peut être réécrite comme suit :

$$s_{(i_1, i_2)} = \sum_{\nu_1 \in \{0, 1\}} \mu_{A_1}^{i_1 + \nu_1}(e_1) \mu_{A_2}^{i_2}(e_2) \phi(i_1 + \nu_1, i_2) + \sum_{\nu_1 \in \{0, 1\}} \mu_{A_1}^{i_1 + \nu_1}(e_1) \mu_{A_2}^{i_2 + 1}(e_2) \phi(i_1 + \nu_1, i_2 + 1) \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$\begin{aligned}\mu_{A_1}^{i_1}(e_1) &= \frac{a_1^{i_1+1} - e_1}{a_1^{i_1+1} - a_1^{i_1}}; \mu_{A_1}^{i_1+1}(e_1) = 1 - \mu_{A_1}^{i_1}(e_1); \\ \mu_{A_2}^{i_2}(e_2) &= \frac{a_2^{i_2+1} - e_2}{a_2^{i_2+1} - a_2^{i_2}}; \mu_{A_2}^{i_2+1}(e_2) = 1 - \mu_{A_2}^{i_2}(e_2);\end{aligned}\tag{II.46}$$

En remplaçant (II.46) dans (II.45), on trouve :

$$s_{(i_1, i_2)} = \Psi^{(i_1, i_2)}(e_1, e_2) = \Psi^{(i_1, i_2)}(e_1) + \Psi_2^{(i_1, i_2)}(e_1) e_2\tag{II.47}$$

Avec :

$$\Psi_1^{(i_1, i_2)}(e_1) = \sum_{\nu_1 \in \{0,1\}} \mu_{A_1}^{i_1+\nu_1}(e_1) \left[\frac{a_2^{i_2+1} \phi(i_1 + \nu_1, i_2) - a_2^{i_2} \phi(i_1 + \nu_1, i_2 + 1)}{a_2^{i_2+1} - a_2^{i_2}} \right]\tag{II.48}$$

Et :

$$\Psi_2^{(i_1, i_2)}(e_1) = \sum_{\nu_1 \in \{0,1\}} \mu_{A_1}^{i_1+\nu_1}(e_1) \left[\frac{\phi(i_1 + \nu_1, i_2 + 1) - \phi(i_1 + \nu_1, i_2)}{a_2^{i_2+1} - a_2^{i_2}} \right]\tag{II.49}$$

L'équation (II.47) montre que le sous système (II.44) est affine en e_2 . On conclut donc que le sous système global est affine en e_2 par morceaux.

Exemple illustratif

Le but de cet exemple est uniquement l'illustration des propriétés structurelles développées précédemment.

Le système utilisé est un procédé de pression dynamique. Le modèle flou de ce système est donné par SOUSA dans [SOU95]. Il est exprimé par un système de Takagi-Sugeno à 2 entrées à conclusions constantes dont la base de règles est une collection de règles de la forme:

$$\begin{aligned}R^{(i_1, i_2)} : \text{Si } y(k) \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } u(k) \text{ est } A_2^{i_2} \text{ Alors } y(k+1) &= \phi(i_1, i_2) \\ i_1 &= 1, \dots, 4; i_2 = 1, \dots, 4\end{aligned}\tag{II.50}$$

La base de règles complète du système est illustrée dans le tableau II.2.

$y \backslash u$	A_2^1	A_2^2	A_2^3	A_2^4
A_1^1	1,06	1,05	1,07	1,11
A_1^2	1,13	1,19	1,23	1,33
A_1^3	1,46	1,51	1,63	1,79
A_1^4	1,84	2,03	2,12	2,34

Tableau II.2. Base de règles du système flou

Dans cet exemple, les deux entrées e_1 et e_2 sont représentées respectivement par $y(k)$ et $u(k)$. La sortie du système s est notée $y(k+1)$.

Le système flou proposé est composé de 9 sous-systèmes flous définis sur 9 mailles floues élémentaires (figure II.11), dans chaque maille, seules 4 règles sont activées à la fois. La sortie de chaque sous-système flou est donnée par l'expression suivante:

$$s_{(i_1, i_2)} = \sum_{(v_1, v_2) \in \{0,1\}^2} \xi^{(i_1+v_1, i_2+v_2)} \phi(i_1+v_1, i_2+v_2) \quad (II.51)$$

$$i_1 = 1, \dots, 3; i_2 = 1, \dots, 3$$

Par exemple, la sortie du sous-système défini sur la maille floue élémentaire (1,1) est donnée par l'expression suivante:

$$s_{(1,1)} = \sum_{(v_1, v_2) \in \{0,1\}^2} \xi^{(1+v_1, 1+v_2)} \phi(1+v_1, 1+v_2) \quad (II.52)$$

$$= (0.350 y(k) + 0.710) + (0.648 y(k) - 0.666) u(k)$$

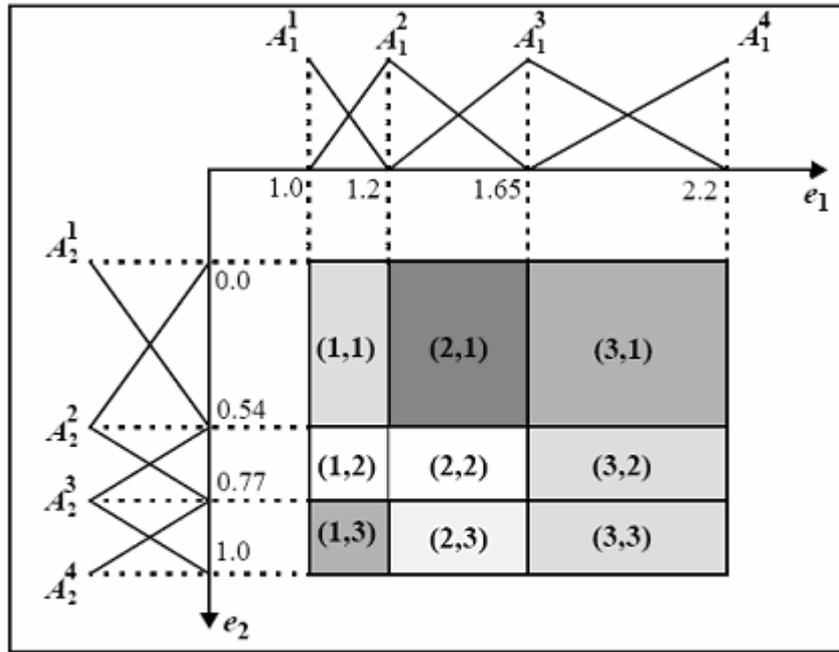


Figure II.11. Mailles floues élémentaires du système

Les sorties des autres sous-systèmes flous sont illustrées sur le tableau II.3 :

Maille floue	Sortie générée par le sous système flou
(1,1)	$0.710 + 0.350 y(k) + (-0.666 + 0.648 y(k)) u(k)$
(1,2)	$0.537 + 0.465 y(k) + (-0.347 + 0.434 y(k)) u(k)$
(1,3)	$1.140 - 0.204 y(k) + (-1.130 + 1.304 y(k)) u(k)$
(2,1)	$0.250 + 0.733 y(k) + (0.160 - 0.041 y(k)) u(k)$
(2,2)	$0.743 + 0.293 y(k) + (-0.753 + 0.772 y(k)) u(k)$
(2,3)	$0.364 + 0.442 y(k) + (-0.260 + 0.579 y(k)) u(k)$
(3,1)	$0.320 + 0.690 y(k) + (-0.685 + 0.471 y(k)) u(k)$
(3,2)	$-0.543 + 1.073 y(k) + (0.913 - 0.237 y(k)) u(k)$
(3,3)	$0.226 + 0.525 y(k) + (-0.086 + 0.474 y(k)) u(k)$

Tableau II.3. Sortie sur chaque maille floue élémentaire

On voit bien que la sortie de chaque sous-système est affine en $u(k)$ et $y(k)$ et sachant qu'à chaque instant la sortie du système global est égale à la sortie d'un sous-système, on en déduit que la sortie du système global est affine en $u(k)$ et $y(k)$ par morceaux.

Donc, l'approximation non linéaire par un système flou de Takagi-Sugeno revient à l'approximation par une fonction affine en chacune des entrées sur une maille élémentaire.

II.7.4. Décomposition du système flou global en sous systèmes élémentaire, cas général

On applique le même raisonnement que pour (II.7.3), mais cette fois on prend le cas général de n entrées :

Supposons un système flou de Takagi-Sugeno avec n entrées e_1, e_2, \dots, e_n donné par une collection de règles de la forme :

$$R^{(i_1, i_2, \dots, i_n)} : \text{Si } e_1 \text{ est } A_1^{i_1} \text{ et } e_2 \text{ est } A_2^{i_2} \text{ et } \dots \text{ et } e_n \text{ est } A_n^{i_n} \text{ Alors } s = \phi(i_1, i_2, \dots, i_n) \quad (\text{II.53})$$

La sortie générée par ce système flou est donnée par :

$$s = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in I^n} \xi^{(i_1, i_2, \dots, i_n)}(e) \phi(i_1, i_2, \dots, i_n) \quad \text{avec : } e = [e_1, \dots, e_n] \text{ et } I^n = I_1 \times \dots \times I_n \quad (\text{II.54})$$

Le système flou (II.35) est défini sur l'univers de discours d'entrée E^n donné par l'expression suivante:

$$E^n = E_1 \times \dots \times E_n = [\alpha_1^{e_1}, \beta_1^{e_1}] \times \dots \times [\alpha_n^{e_n}, \beta_n^{e_n}] \quad (\text{II.55})$$

Où $\alpha_p^{ep}, \beta_p^{ep}$; $p=1, \dots, n$ sont respectivement la valeur minimale et maximale de l'intervalle définissant l'univers de discours E_p

Chaque sous-univers de discours E_p peut être décomposé comme suit:

$$E_p = [\alpha_p^{ep}, \beta_p^{ep}] = \bigcup_{i_p=1}^{n_p-1} [a_p^{ip}, a_p^{ip+1}]; \quad p = 1, \dots, n \quad (\text{II.56})$$

Où a_p^{ip} est la valeur modale de l'ensemble A_p^{ip} vérifiant :

$$\mu_{A_p^{ip}}(a_p^{ip}) = 1 \quad (\text{II.57})$$

De plus, on définit :

$$E_{(i_1, \dots, i_n)}^n = [a_1^{i_1}, a_1^{i_1+1}] \times \dots \times [a_n^{i_n}, a_n^{i_n+1}]; \quad (i_1, \dots, i_n) \in I^{n*} \quad (\text{II.58})$$

$$I^{n*} = \left\{ (i_1, \dots, i_n) / p = 1, \dots, n ; i_p = 1, \dots, n_p - 1 \right\}$$

Pour chaque entrée e_p on définit n_p fonctions d'appartenance triangulaires, nous aurons donc $n_p - 1$ intervalles, et il n'y aura que de 2 règles qui seront activées pour chaque entrée.

Chaque $E_{(i_1, \dots, i_n)}^n$ représente un hypercube qu'on appellera maille floue élémentaire. Seules 2^n règles floues sont activées pour chaque maille.

L'univers de discours E^n est l'union des différentes mailles le composant et peut être reformulé comme suit:

$$E^n = \bigcup_{(i_1, \dots, i_n) \in I_k^n} E_{(i_1, \dots, i_n)}^n \quad (\text{II.59})$$

Le système flou est composé de $\prod_{p=1}^n (n_p - 1)$ sous systèmes flous $\Sigma_f^{(i_1, \dots, i_n)}$, chaque sous système est défini par 2^n règles floues suivantes :

$$\begin{aligned} R_{(i_1, \dots, i_n)}^{(v_1, \dots, v_n)} : \text{Si } e_1 \text{ est } A_1^{i_1+v_1} \text{ et } \dots \text{ et } e_n \text{ est } A_n^{i_n+v_n} \text{ Alors :} \\ s_{(i_1, \dots, i_n)} = \phi(i_1 + v_1, \dots, i_n + v_n) ; p = 1, \dots, n ; v_p = \{0, 1\} \end{aligned} \quad (\text{II.60})$$

Où (i_1, \dots, i_n) dans $R_{(i_1, \dots, i_n)}^{(v_1, \dots, v_n)}$ fait référence au sous-système $\Sigma_f^{(i_1, \dots, i_n)}$ et (v_1, \dots, v_n) désigne une règle particulière de ce sous-système. Tout sous-système flou de la forme (II.55) est défini sur le sous-espace $E_{(i_1, \dots, i_n)}^n$.

L'ensemble des indices d'un sous-système est donné par:

$$IS = \{(v_1, \dots, v_p) / p = 1, \dots, n ; v_p = \{0, 1\}\} \quad (\text{II.61})$$

Dans ce cas, pour une entrée e appartenant à la maille floue $E_{(i_1, \dots, i_n)}^n$, la sortie générée par le sous-système flou $\Sigma_f^{(i_1, \dots, i_n)}$ est donnée par:

$$s_{(i_1, \dots, i_n)} = \sum_{(v_1, \dots, v_n) \in IS} \xi^{(i_1+v_1, \dots, i_n+v_n)} \phi(i_1 + v_1, \dots, i_n + v_n) \quad (\text{II.62})$$

Finalement, on peut conclure que pour une entrée e la sortie du système flou global est égale à la sortie générée par un sous-système de la forme (II.60). Autrement dit, à chaque instant un seul sous-système flou composé de 2^n règles floues est activé.

II.7.5. Systèmes flous affines en une entrée

En développant (II.62) par rapport à v_n , la sortie du sous système flou peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} s_{(i_1, \dots, i_n)} = \sum_{(v_1, \dots, v_{n-1}) \in IS} \xi^{(i_1+v_1, \dots, i_{n-1}+v_{n-1})} (Z_1) \mu_{A_n}^{i_n} (e_n) \phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n) + \\ \sum_{(v_1, \dots, v_{n-1}) \in IS} \xi^{(i_1+v_1, \dots, i_{n-1}+v_{n-1})} (Z_1) \mu_{A_n}^{i_n+1} (e_n) \phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n + 1) \end{aligned} \quad (\text{II.63})$$

Avec :

$$\mu_{A_n}^{i_n} (e_n) = \frac{a_n^{i_n+1} - e_n}{a_n^{i_n+1} - a_n^{i_n}} ; \mu_{A_n}^{i_n+1} (e_n) = 1 - \mu_{A_n}^{i_n} (e_n) ; Z_1 = [e_1, \dots, e_{n-1}] \quad (\text{II.64})$$

$$\text{Et :} \quad IS = \{(v_1, \dots, v_{p-1}) / p = 1, \dots, n-1 ; v_p = \{0, 1\}\} \quad (\text{II.65})$$

Par substitution de l'équation (II.64) dans (II.63), on trouve :

$$s_{(i_1, \dots, i_n)} = \Psi^{(i_1, \dots, i_n)}(e) = \Psi_1^{(i_1, \dots, i_n)}(Z_1) + \Psi_2^{(i_1, \dots, i_n)}(Z_1) e_n \quad (\text{II.66})$$

Avec :

$$\Psi_1^{(i_1, \dots, i_n)}(Z_1) = \sum_{(v_1, \dots, v_{n-1}) \in IS} \xi^{(i_1+v_1, \dots, i_{n-1}+v_{n-1})}(Z_1) \cdot \left[\frac{a_n^{i_n+1} \phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n) - a_n^{i_n} \phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n + 1)}{a_n^{i_n+1} - a_n^{i_n}} \right] \quad (\text{II.67})$$

Et :

$$\Psi_2^{(i_1, \dots, i_n)}(Z_1) = \sum_{(v_1, \dots, v_{n-1}) \in IS} \xi^{(i_1+v_1, \dots, i_{n-1}+v_{n-1})}(Z_1) \cdot \left[\frac{\phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n + 1) - \phi(i_1 + v_1, \dots, i_{n-1} + v_{n-1}, i_n)}{a_n^{i_n+1} - a_n^{i_n}} \right] \quad (\text{II.68})$$

L'équation (II.66) montre que le sous-système flou (II.62) est affine en e_n . Sachant qu'à chaque instant la sortie du système global est égale à la sortie d'un sous-système, on peut déduire que la sortie du système global est affine en e_n par morceaux. De manière similaire, on peut démontrer que le sous-système (II.62) est affine en e_1 ou e_2, \dots ou e_n , et finalement en chacune de ses entrées. On voit donc que l'approximation du système non linéaire par un système flou de Takagi-Sugeno revient à l'approximation du système par une fonction affine en chacune des entrées sur une maille élémentaire. [BOU00].

II.8. Commande floue discrète

La linéarisation entrée-sortie a suscité beaucoup d'intérêt dans le domaine continu (systèmes non linéaires continus), comme en témoigne le nombre de travaux publiés dans la littérature [ISI85][SAS89][SLO91][MAR95]. Cependant, dans un cadre discret (systèmes non linéaires discrets), on dispose de très peu de recherches sur le sujet. Cela est sans doute dû au fait que la *L.E.S* est particulièrement bien adaptée aux systèmes affines en la commande, hypothèse fréquemment rencontrée dans le domaine continu mais peu valide pour les systèmes discrets. [BOU00]

D'une manière générale, une classe de systèmes non linéaires discrets peut être transformée en une classe de systèmes linéaires à travers la linéarisation entrée-sortie discrète (*L.E.S.D*). Dans ce cas, le système linéaire transformé peut être commandé par des méthodes courantes de l'automatique (placement de pôles discrets, synthèse quadratique, ... etc.). [BOU00]

La linéarisation entrée-sortie discrète floue (*L.E.S.D.F*) est une *L.E.S.D* classique qui emploie un modèle flou pour représenter la dynamique d'un système non linéaire discret. Notre objectif est d'appliquer le concept de la *L.E.S.D.F* sur notre système afin d'assurer les objectifs de commande, c-a-d, la régulation.

II.8.1. Linéarisation entrée-sortie Discrète Floue (L.E.S.D.F) [BOU00]

L'objectif de la linéarisation entrée- sortie discrète est de déterminer une loi de commande $u(k)$ basée sur le concept de la L.E.S.D telle que la boucle fermée reste stable et l'erreur entre la sortie du système et la sortie désirée converge vers zéro.

L'implantation de la L.E.S.D classique nécessite la connaissance de Ψ_d et son inversion. Cette fonction non linéaire étant supposée inconnue, elle sera approximée par un système flou de Takagi-Sugeno à conclusion constante qu'on suppose dans un premier temps connu. La sortie générée par le système flou est donnée par :

$$\begin{aligned} y_f(k+1) &= \psi_{fd}[Z(k)] = \psi_{fd}[Z_1(k), u(k)] \\ Z(k) &= [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \quad (\text{II.69}) \\ Z_1(k) &= [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \end{aligned}$$

Il a été montré précédemment que la sortie générée par un système flou de Takagi-Sugeno peut être réécrite, à chaque instant, comme un système affine en une entrée sur une maille. Dans ce cas, la sortie (II.69) peut être mise sous la forme affine en la commande suivante :

$$y_f(k+1) = \psi_1[Z_1(k)] + \psi_2[Z_1(k)] u(k) \quad (\text{II.70})$$

Où ψ_{a1} et ψ_{a2} représentent les fonctions analytiques permettant d'exprimer la sortie du système flou sur la maille activée.

La L.E.S.D.F est synthétisée à partir du modèle flou nominal.

Selon le principe de la L.E.S.D, l'introduction d'une référence $y_r(k+1)$ telle que :

$$y_r(k+1) = \psi_d[Z(k)] = \psi_d[Z_1, u(k)] \quad (\text{II.71})$$

Où Ψ_d est la fonction non linéaire représentant la relation entrée-sortie du système considéré et Z_1 le vecteur d'entrée regroupant les commandes passées et sorties présentes et passées.

La loi de commande floue est choisie comme suit :

$$u = -\frac{\psi_1}{\psi_2} + \frac{y_r(k+1)}{\psi_2} \quad (\text{II.72})$$

ce qui correspond en fait à résoudre l'inversion de ψ_{fd} par la méthode analytique proposée au paragraphe (II.8.5), en supposant que la valeur de $u(k)$ se trouve bien sur la maille considérée, sinon, il faudra chercher une autre maille.

Par substitution de (II.72) dans (II.71), on vérifie bien que :

$$y_r(k+1) = y_f(k+1) \quad (\text{II.73})$$

Comme nous approximons la sortie de notre système par un système flou, nous avons donc :

$$y(k+1) = y_f(k+1) + \Delta \quad (\text{II.74})$$

Où Δ représente l'erreur d'identification ou de modélisation, Δ étant toujours supposé négligeable.

Une stratégie de placement de pôles peut être adoptée pour imposer une dynamique à la boucle fermée. La nouvelle entrée $y_r(k+1)$ du système linéarisé est alors choisie comme suit :

$$y_r(k+1) = y_d(k+1) + \eta[y_d(k) - y(k)] = y_d(k+1) + \eta e(k) \quad (\text{II.75})$$

Où $e(k) = y_d(k) - y(k)$ représente l'erreur de suivi de trajectoire.

Par substitution de (II.73) et (II.74) dans (II.75), on déduit l'équation d'erreur :

$$e(k+1) + \eta e(k) = -\Delta \quad (\text{II.76})$$

L'erreur de suivi de trajectoire converge donc vers une balle de rayon $\frac{\Delta_0}{1+\eta}$ autour de zéro, en supposant Δ borné par Δ_0 .

II.9. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les notions de base de la théorie de la logique floue, la représentation d'un régulateur flou et ses différents constituants, ainsi que l'application de la logique floue dans la commande.

L'architecture d'un système flou est déterminée par l'utilisateur. Nous avons constaté qu'il n'existe pas un seul type de système flou mais plusieurs, c'est à l'utilisateur de décider de la méthode de défuzzification, du type des fonctions d'appartenance, des règles floues, et la stratégie de défuzzification.

Les systèmes flous exigent la disponibilité d'une expertise. Par conséquent, les performances de ces derniers sont étroitement liées aux techniques d'acquisition de connaissances et de justesse des informations acquises. Pour pallier à ces inconvénients, des méthodes combinant la logique floue et les réseaux de neurones ont été développées. De ce fait, les systèmes flous ainsi obtenus ont développé une capacité d'apprentissage.

Lors de la seconde partie de ce chapitre, nous avons présenté la stratégie de commande neuro-floue adaptative utilisée lors de notre application. Cette stratégie repose sur la combinaison des avantages qu'offrent les régulateurs flous et neuronaux pour obtenir un régulateur plus performant. En effet, elle repose sur l'implémentation d'un régulateur flou par un réseau connexionniste équivalent.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous présentons la commande LESDF qui repose sur les propriétés des systèmes flous de Takagi-Sugeno à conclusion constante et en utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires

Nous avons montré que la sortie globale d'un système flou est égale à la sortie générée par un sous système flou défini sur une maille floue élémentaire. Cette propriété permet de faciliter l'étude des systèmes flous complexes en les étudiant sur chaque sous système. De plus, sur une maille élémentaire, l'approximation par Takagi-Sugeno revient à l'approximation par une fonction affine en chacune des entrées. L'inversion du modèle flou peut alors être réalisée sous réserve que le système soit à phase minimale.

L'identification des systèmes flous de Takagi-Sugeno peut être effectuée par des méthodes classiques d'identification car ils sont linéaires en paramètres.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différentes stratégies de commande se basant sur les théories développées précédemment ainsi que les résultats de simulation obtenus en les appliquant à notre colonne d'absorption pilote.

Chapitre III :

Commandes Floue, Neuro-Floue, et L.E.S.D.F.

Appliquées à la Colonne d'Absorption

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus par l'application des stratégies de commande floue, neuro-floue, et L.E.S.D.F. exposées dans le chapitre II pour deux différents points de fonctionnement de la colonne d'absorption pilote et ce pour différentes perturbations intervenant sur la concentration de CO₂, le débit de gaz en entrée ainsi qu'une variation de consigne.

Pour chacune des commandes nous effectuerons plusieurs essais correspondants à différents niveaux de perturbations et cela afin d'étudier la robustesse ainsi que les performances des régulateurs utilisés. Nous aborderons également l'influence de la taille de la base des règles pour le régulateur flou et celle d'une mauvaise initialisation des poids des règles en ce qui concerne le régulateur neuro-flou adaptatif.

Cette étude sera complétée par une comparaison entre les différentes stratégies de commande abordées dans ce chapitre.

III.2. Présentation des stratégies de commande

III.2.1. Régulateur flou

Le régulateur flou synthétisé dans notre application est de type Takagi-Sugeno, il possède deux entrées (erreur en sortie du système et l'approximation de sa dérivée) et une seule sortie (variation de la commande) :

$e(k)$: Erreur en sortie du système = (sortie désirée) – (sortie du système).

$de(k) = e(k) - e(k-1)$: Approximation de la dérivée de l'erreur.

$u^*(k)$: Variation de la commande qui représente la variation du débit de MEA.

Chacune des deux entrées possède 7 variables linguistiques (7 prédicats) {GN, MN, PN, Z, PP, MP, GP}, où les termes GN, MN,, et PP sont les abréviations des termes « grand négatif », « moyen négatif », ..., et « petit positif », respectivement. Nous aboutissons donc ainsi à une base de règles comprenant 49 règles.

Les fonctions d'appartenance choisies pour chaque prédicat sont des fonctions gaussiennes. On normalise les données en divisant e et de respectivement par e_{\max} et de_{\max} . Les paramètres de ces fonctions sont choisis après normalisation de la manière suivante :

$[a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i7}] \in [-1, 1]$, et $b_{ij} = 0.5$, pour $i=1, 2$ et $j=1, 2, \dots, 7$ avec :

a_{ij} : Centres des fonctions d'appartenances Gaussienne.

b_{ij} : Largeur des fonctions d'appartenances Gaussienne.

Ces paramètres sont choisis de manière à couvrir uniformément l'univers de discours $[-1, 1]$. Les fonctions d'appartenance Gaussienne sont données par l'équation :

$$f_{ij}(x) = \exp\left(-\frac{(x - a_{ij})^2}{b_{ij}^2}\right) \quad (\text{III.1})$$

Pour $i=1,2$ et $j=1,2,\dots,7$.

Le schéma de la commande utilisée est donné par la figure (III.1).

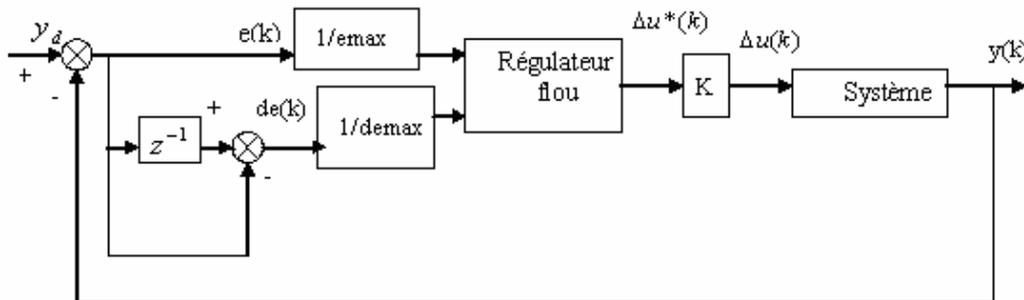


Figure III.1. Schéma de la stratégie de commande floue

Avec :

y_d : point de fonctionnement.

$y(t)$: sortie du système (concentration en haut de la colonne).

K : gain de dénormalisation en sortie du régulateur

$\Delta u^*(k)$: variation du gain normalisé

$\Delta u(k)$: variation du gain réel

III.2.2 Régulateur neuro-flou adaptatif

Ce régulateur est construit sous forme d'un réseau connexioniste à quatre couches. Sa structure est choisie de la manière à ce que chacune des deux variables d'entrée (l'erreur en sortie du système et sa dérivée) possède 7 variables linguistiques (7 prédicats).

Le régulateur ainsi synthétisé est équivalent à un régulateur flou classique, où les couches 1 et 2 correspondent à la partie prémisse des règles floues, et les couches 3 et 4 à la partie conclusion de ces dernières, à la seule différence que le régulateur neuro-flou possède en plus une faculté d'adaptation de ses paramètres en temps réel grâce à un algorithme d'apprentissage. L'adaptation s'effectue sur les conclusions des règles w_{ij} . L'algorithme d'apprentissage utilisé pour l'ajustement des paramètres est un algorithme de rétropropagation du gradient basé sur la minimisation de la fonction de l'erreur en sortie du système $E = \frac{1}{2}(y - y_d)^2$. voir(II.6.1)

Les poids initiaux $w_{ij}(0)$ représentant les conclusions initiales des règles sont posés de manière à avoir de bons résultats avec un minimum d'itérations.

Les fonctions d'appartenance choisies sont de type gaussiennes, leurs paramètres sont constants et ont été choisis de la même manière que pour le régulateur flou.

Le schéma de la commande est donné par la figure suivante :

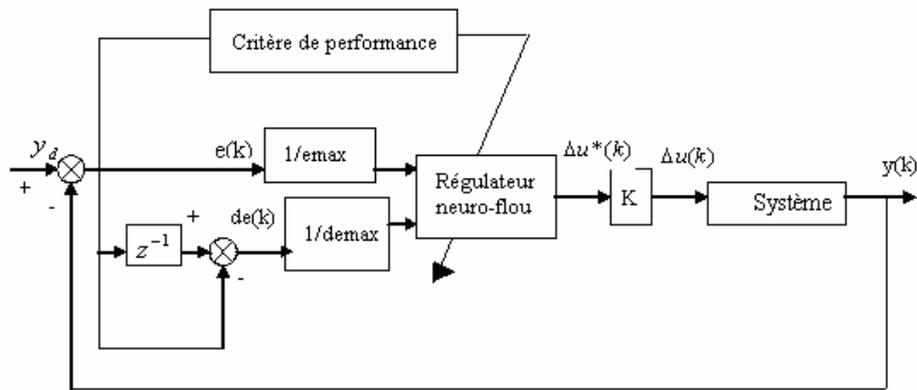


Figure III.2. Schéma de la stratégie de commande neuro-floue

III.2.3. Linéarisation entrée-sortie Discrète Floue (L.E.S.D.F)

Application à notre système

Notre objectif est de déterminer une loi de commande du (k) basée sur le concept de la L.E.S.D.F telle que la boucle fermée reste stable et l'erreur entre la sortie du système et la sortie désirée converge vers zéro.

Le régulateur flou synthétisé dans notre application est de type Takagi-Sugeno, les variables mises en jeu sont : l'erreur en sortie du système et l'approximation de sa dérivée ainsi que la variation de la commande qui sont normalisées :

$ey(k)$: Erreur en sortie du système = (sortie désirée) – (sortie du système).

$dey(k) = e(k) - e(k-1)$: approximation de la dérivée de l'erreur.

$du(k)$: Variation de la commande qui représente la variation du débit de MEA.

Les fonctions d'appartenance choisies pour chaque prédicat sont des fonctions triangulaires. Les paramètres de ces fonctions sont choisis de la manière à couvrir uniformément l'univers de discours normalisé [-1,1]. Chacune des entrées est caractérisée par 3 fonctions d'appartenance, nous aurons donc 27 règles au total.

La sortie du système flou est donnée sous la forme :

$$y_f(k+1) = \xi^T \cdot \phi_{fd} \quad (\text{III.2})$$

Où : ξ est le vecteur correspondant aux degrés de validité des règles au point considéré et ϕ_{fd} est le vecteur des paramètres estimés correspondant aux conclusions des règles

Les fonctions d'appartenance pour ey sont notées μ_{ie} , avec $i = 1, 2, 3$.

Les fonctions d'appartenance pour dey sont notées μ_{jde} , avec $j = 1, 2, 3$.

Les fonctions d'appartenance pour du sont notées μ_{ldu} , avec $l = 1, 2, 3$.

structure de commande vis-à-vis d'incertitudes de modélisation et l'erreur ne converge pas vers zéro mais vers une balle centrée autour de zéro. Pour compenser l'influence de l'erreur d'approximation floue sur les performances de commande et ainsi assurer la robustesse de la structure de commande, on introduit un régulateur intégrateur linéaire de fin de course. Ainsi, dès que l'erreur de suivi de trajectoire entre dans une plage de $\pm 3.5\%$ autour de la référence, le régulateur de fin de course prendra le relais et annulera l'erreur due aux incertitudes causées par l'approximation floue.

III.3. Résultats de la simulation

Dans ce qui suit, nous allons exposer les résultats obtenus par l'exécution des programmes de simulation des différentes stratégies de commande. Ces programmes ont été réalisés sous MATLAB 6.5.

Nous présenterons les réponses du système correspondant aux différents niveaux de perturbation sur la concentration de CO_2 et le débit du gaz à l'entrée de la colonne et ce pour deux points de fonctionnement distincts et pour les trois stratégies de commande évoquées. Nous illustrerons également l'influence de la taille de la base de règles sur les performances du régulateur flou en comparant les performances obtenues avec 9 règles correspondant à 3 fonctions d'appartenance sur e et de , 25 règles, et finalement 49 règles. Pour le régulateur neuro-flou adaptatif, nous montrerons l'influence de l'initialisation des poids sur la réponse du système, et cela en prenant deux valeurs initiales différentes, ce qui correspond aux choix 1 et 2, choisis de manière aléatoire et ce afin de montrer l'importance de l'initialisation des poids. Nous aborderons également le cas d'un changement de consigne.

1. Régulateur flou

1.1. Premier point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

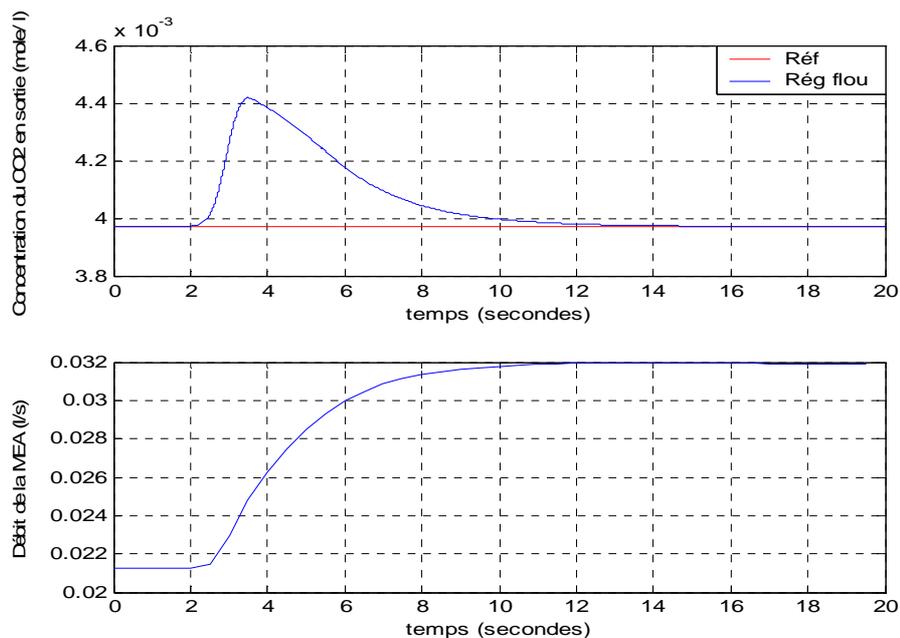


Figure III.3. Concentration en sortie du CO_2 et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de $+10\%$

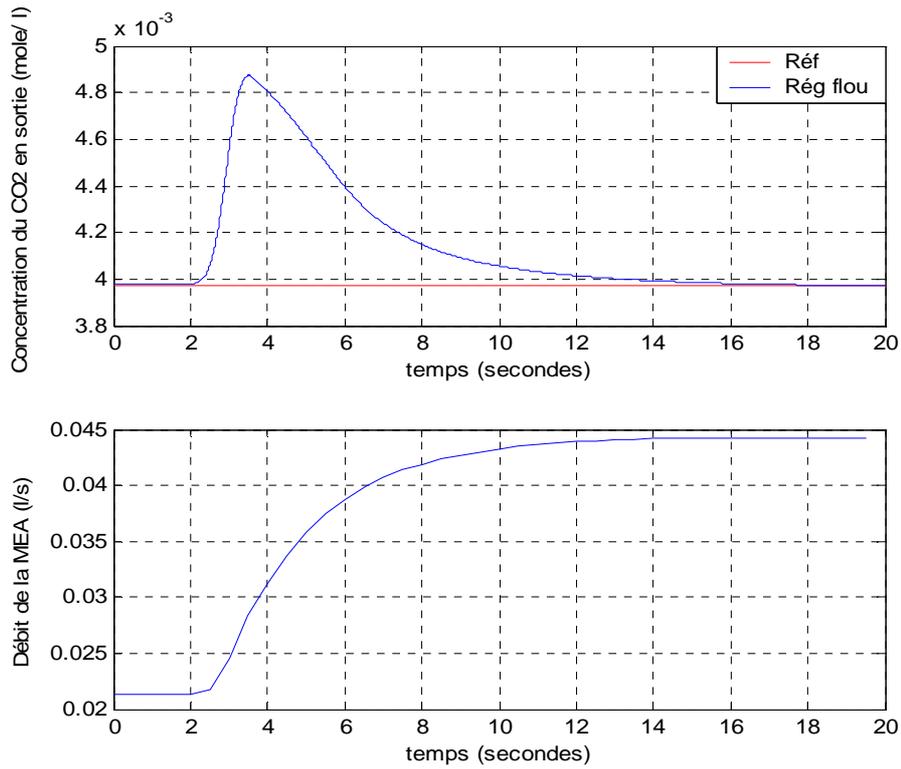


Figure III.4. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

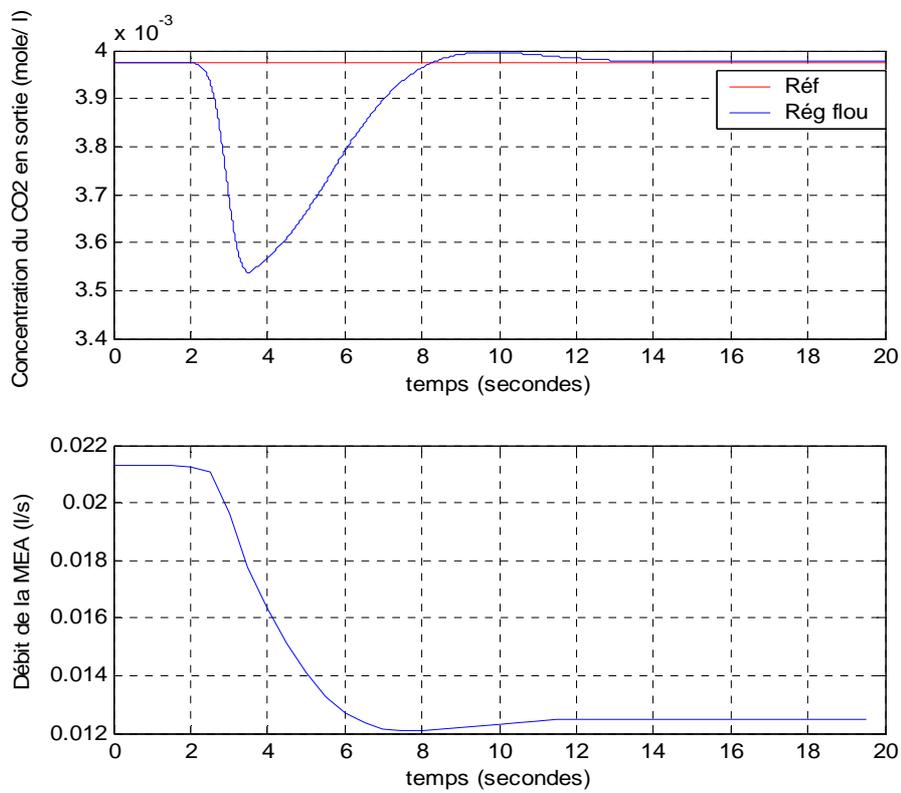


Figure III.5. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

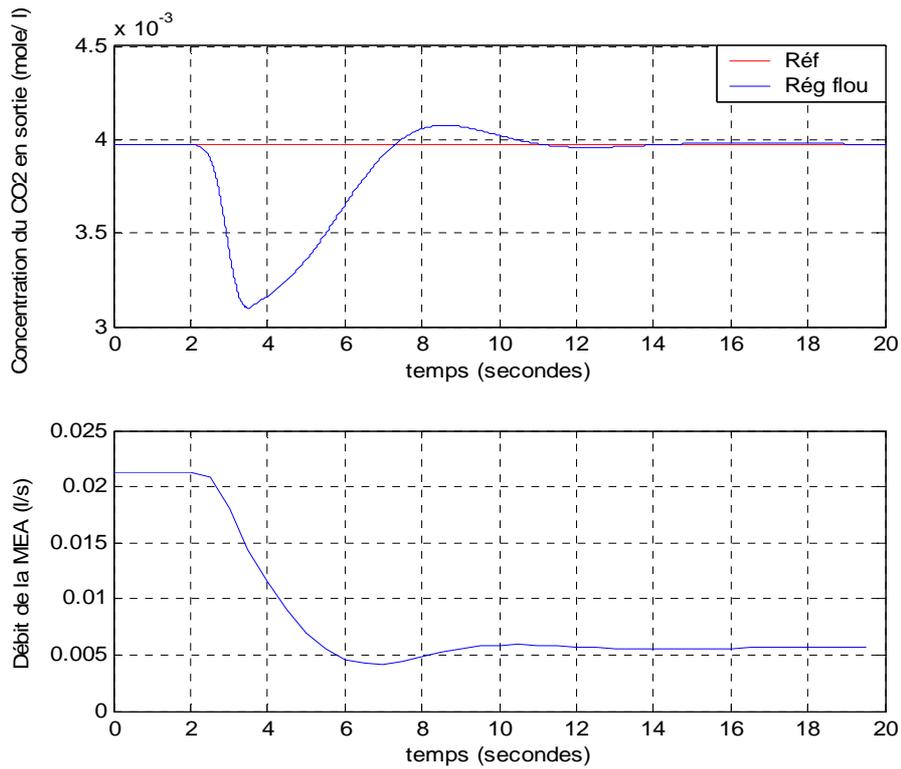


Figure III.6. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

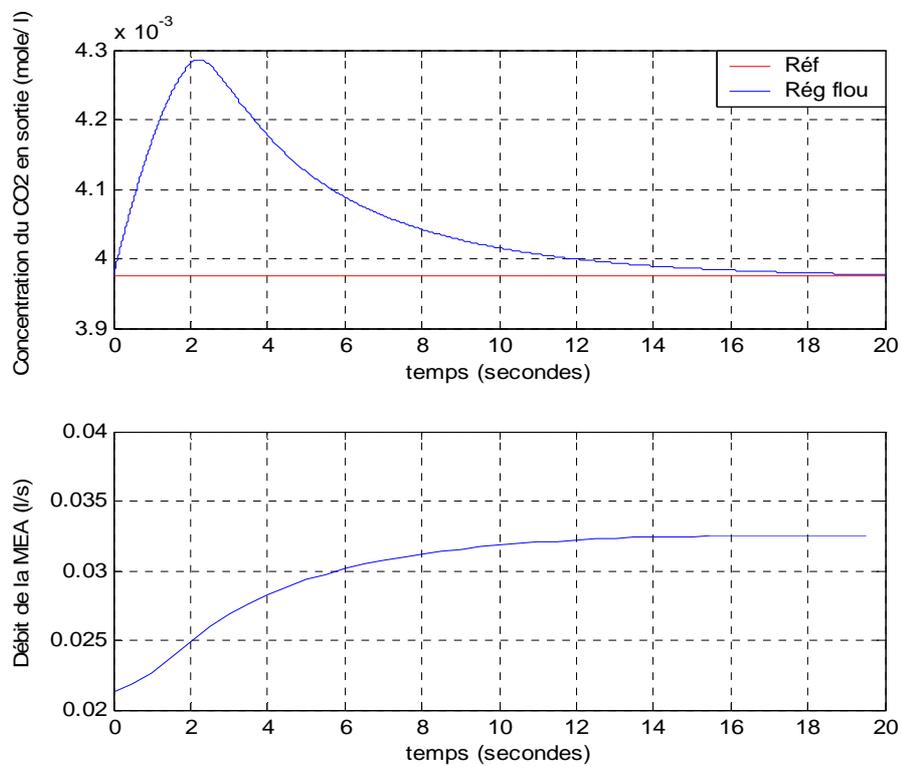


Figure III.7. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

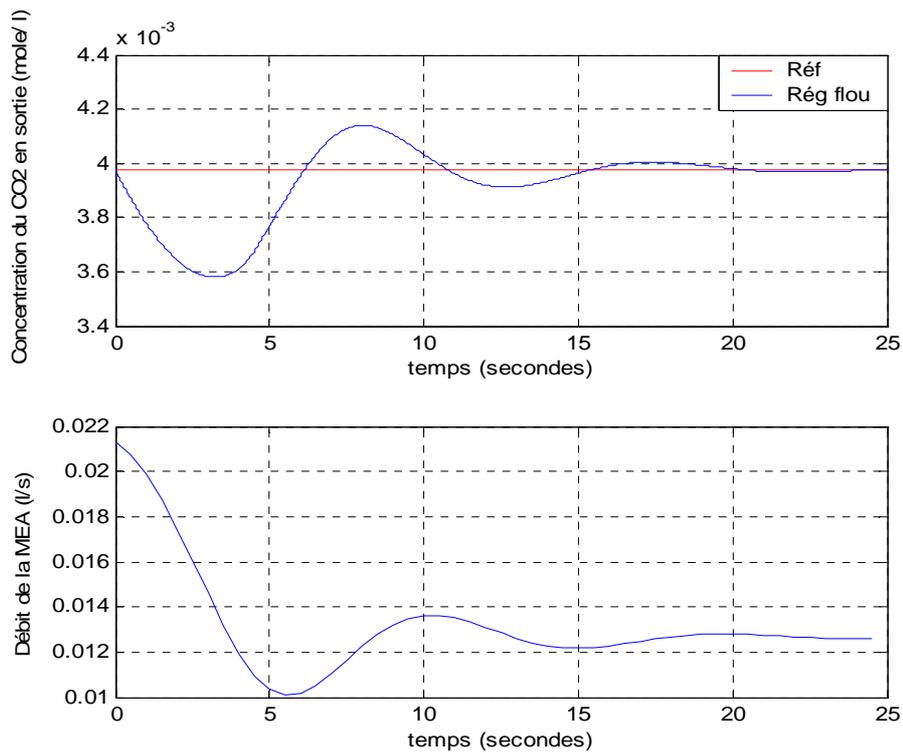


Figure III.8. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Influence de la taille de la base des règles

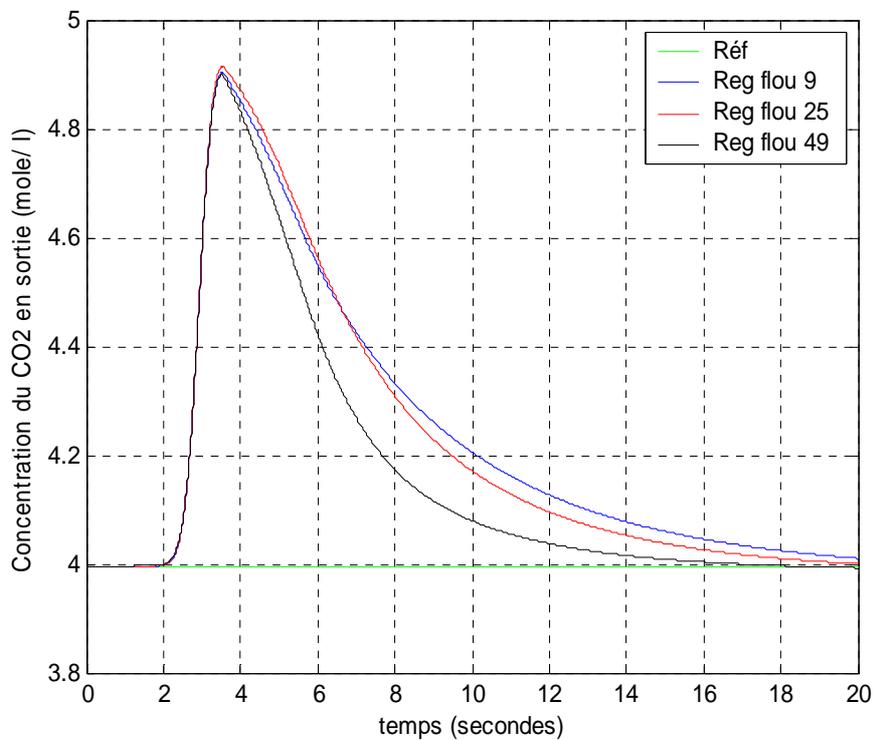


Figure III.9. Influence de la taille de la base des règles sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

d. Variation de consigne

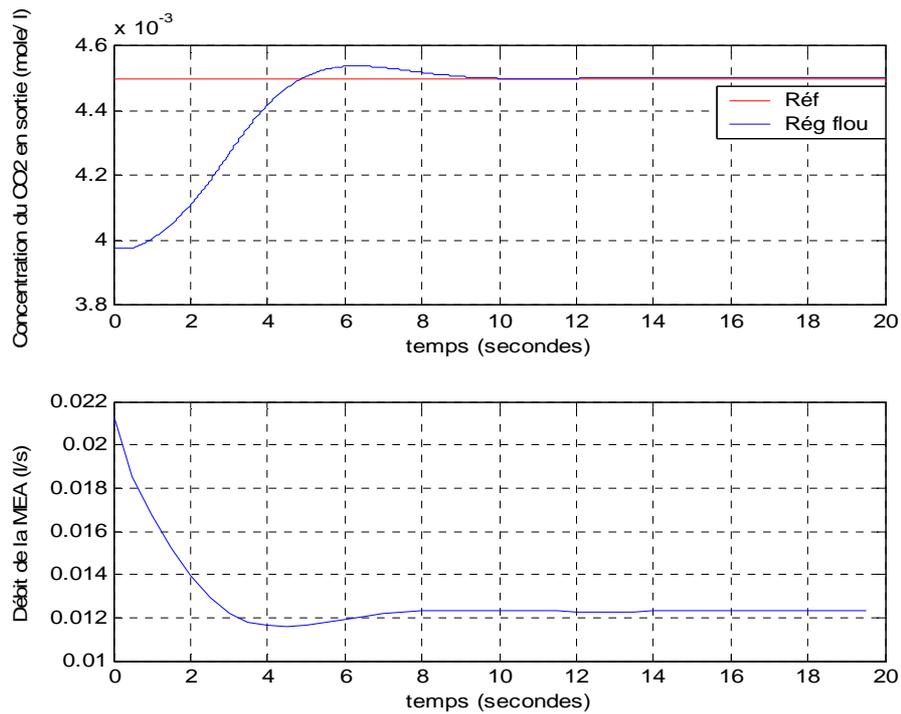


Figure III.10. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

1.2. Second point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

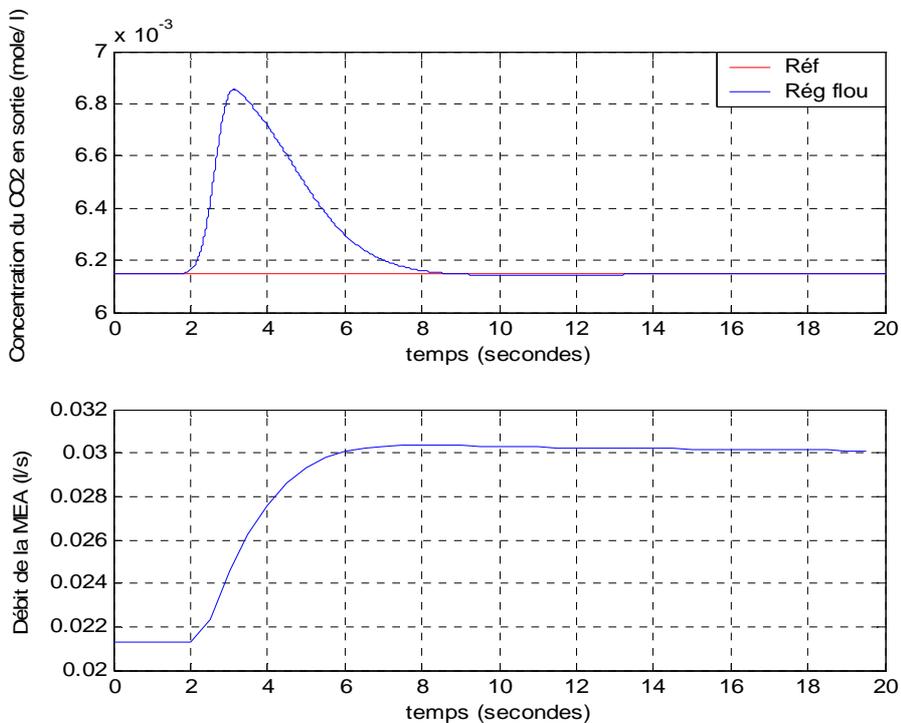


Figure III.11. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

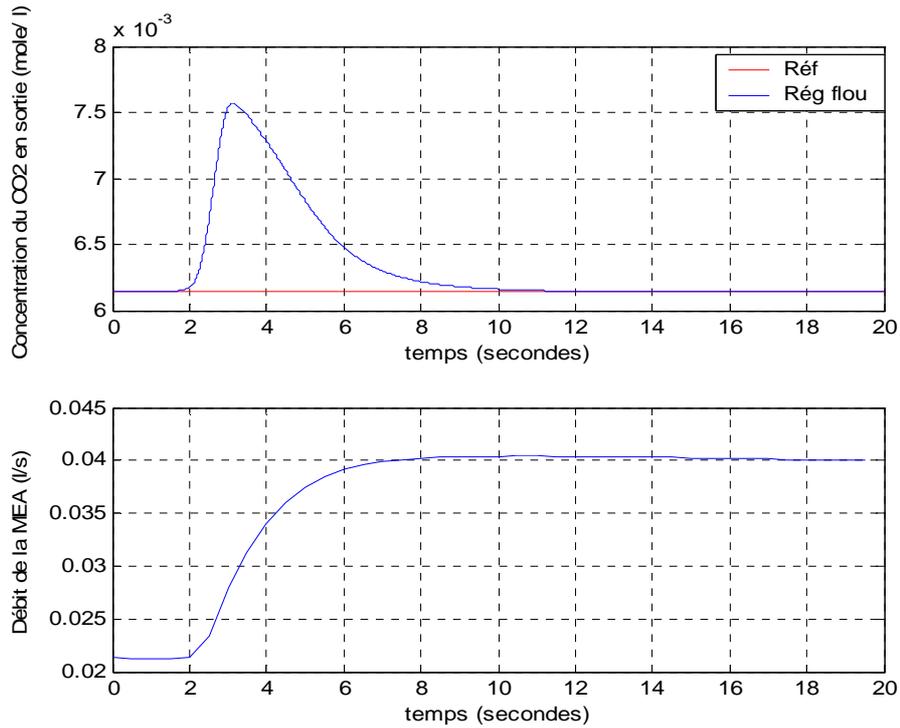


Figure III.12. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

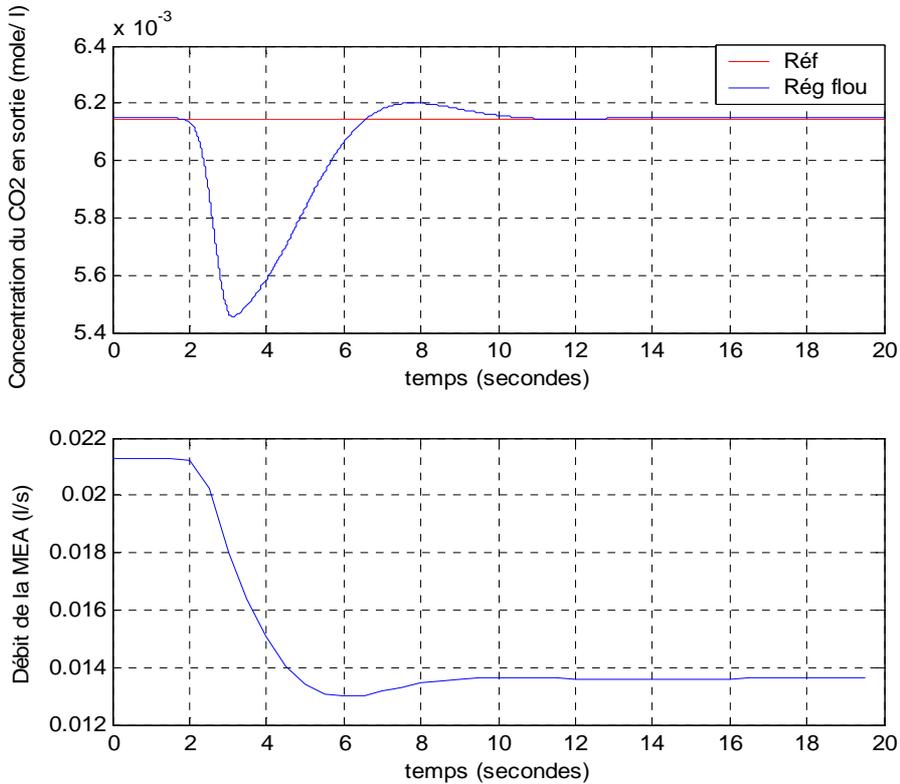


Figure III.13. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

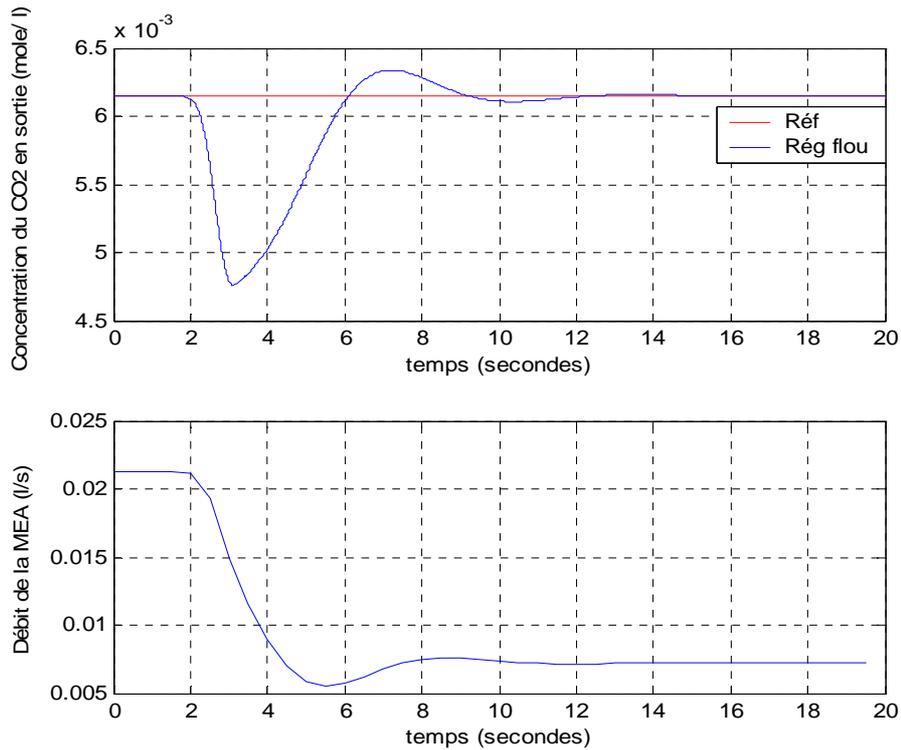


Figure III.14. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

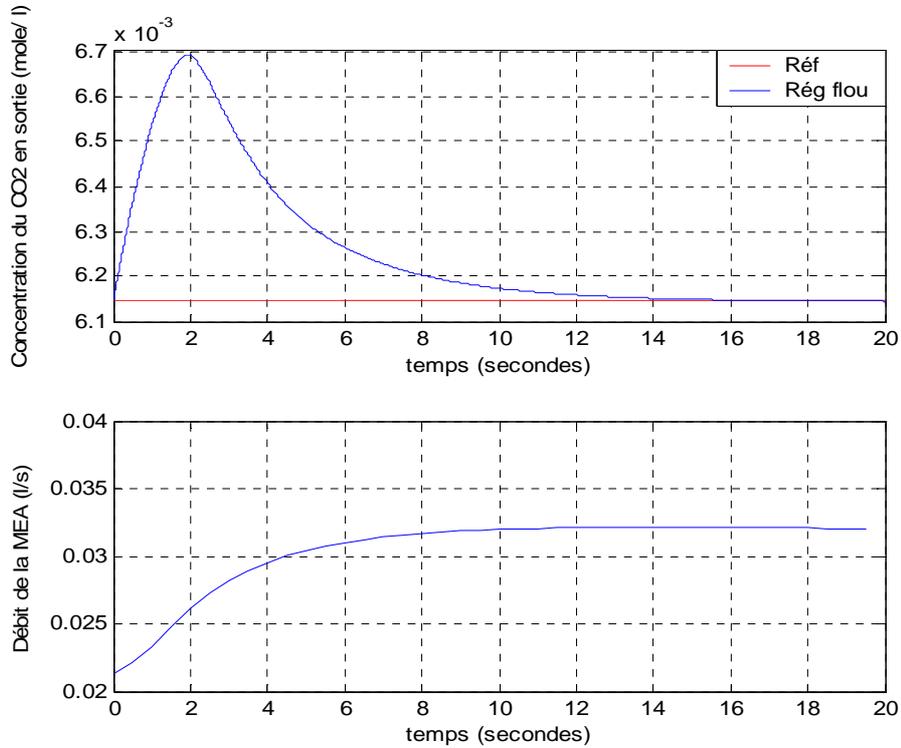


Figure III.15. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

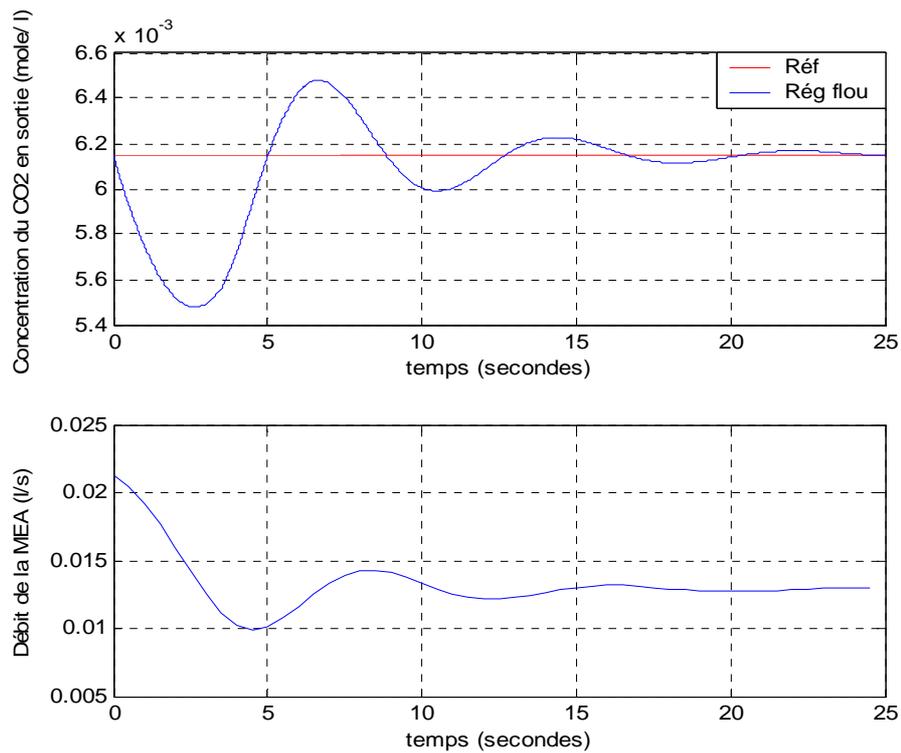


Figure III.16. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Influence de la taille de la base des règles

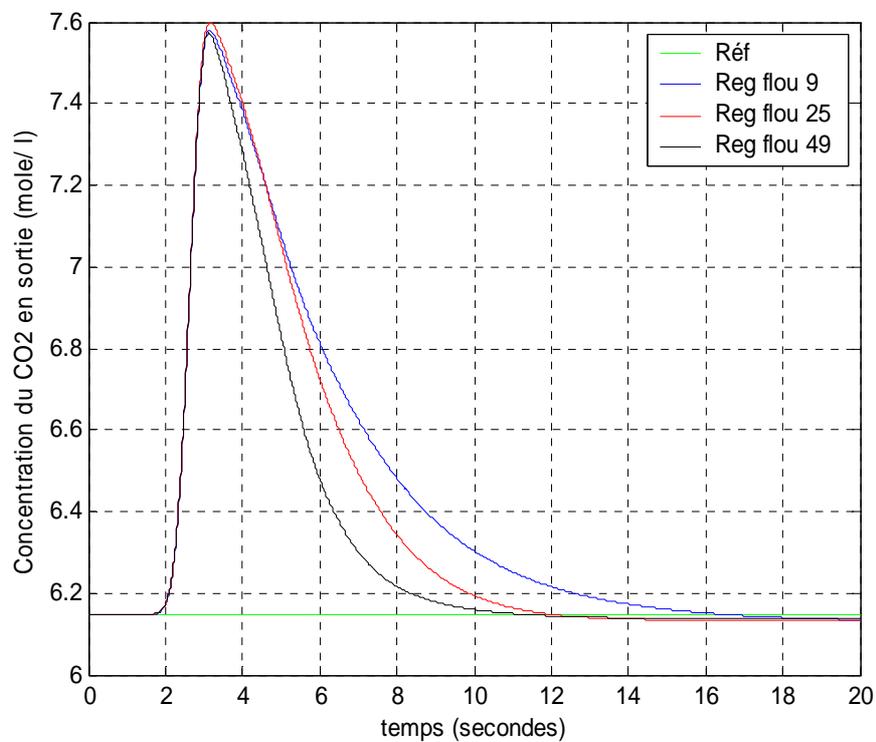


Figure III.17. Influence de la taille de la base des règles sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

d. Variation de consigne

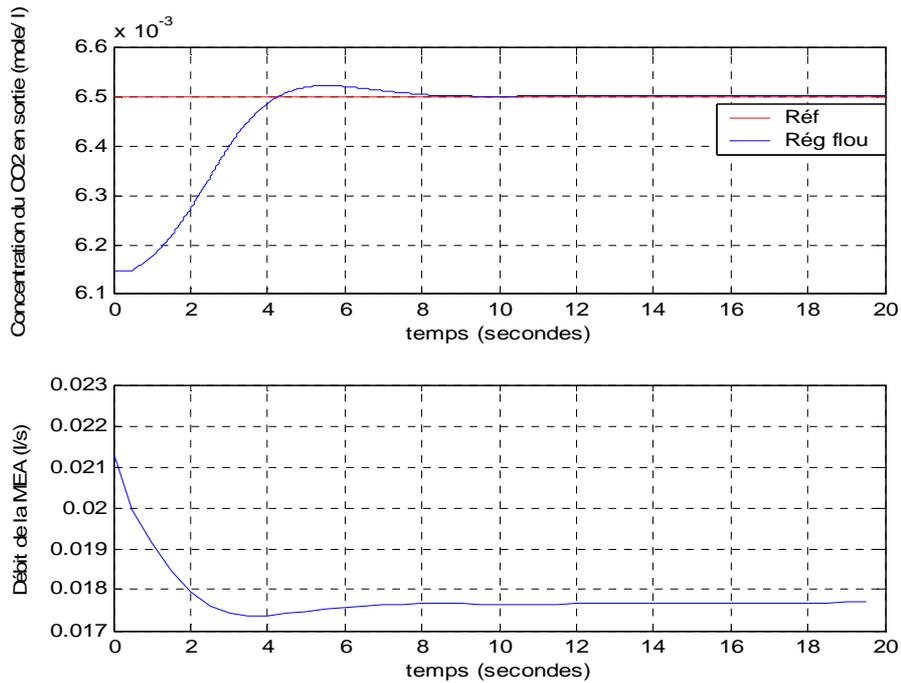


Figure III.18. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

2. Régulateur neuro-flou adaptatif

2.1. Premier point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

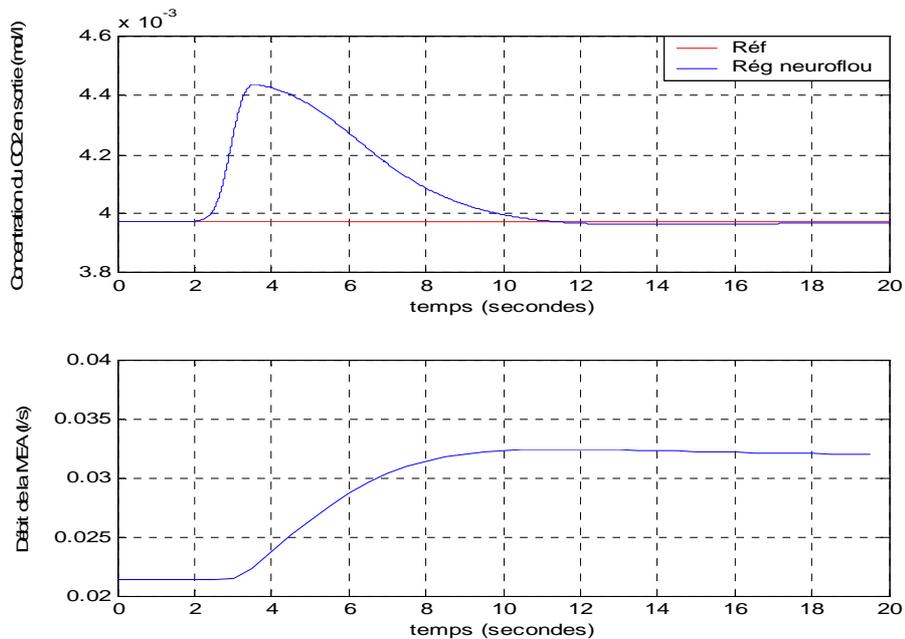


Figure III.19. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

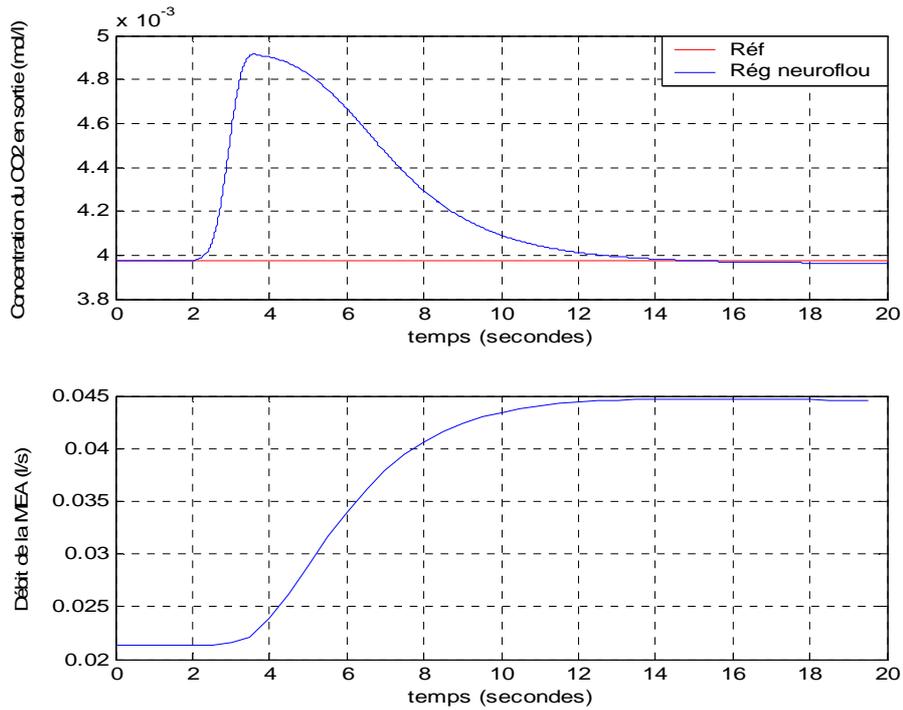


Figure III.20. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

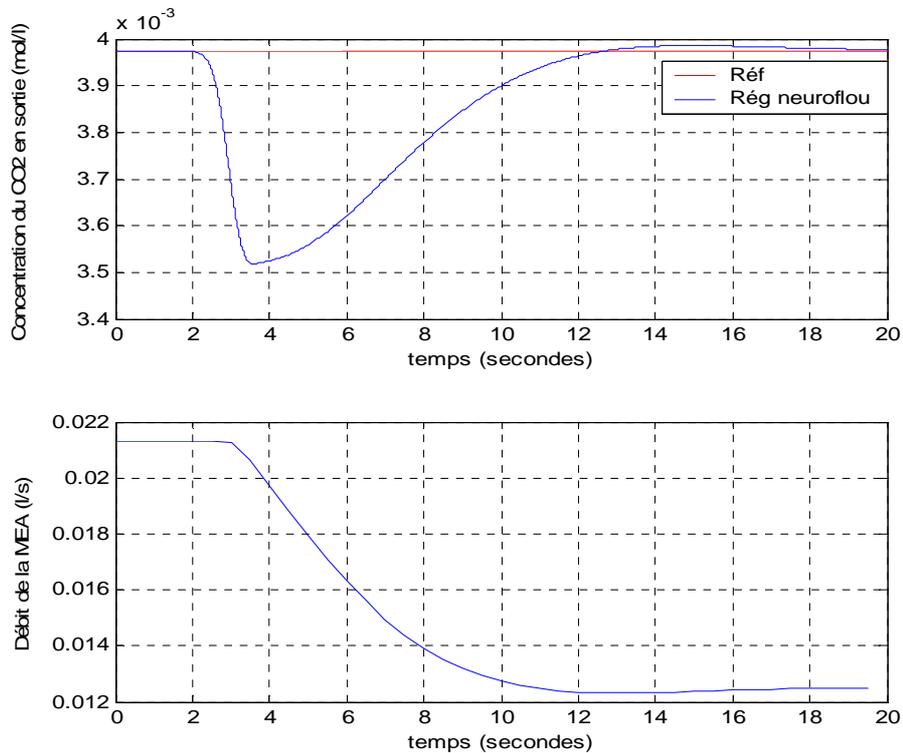


Figure III.21. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

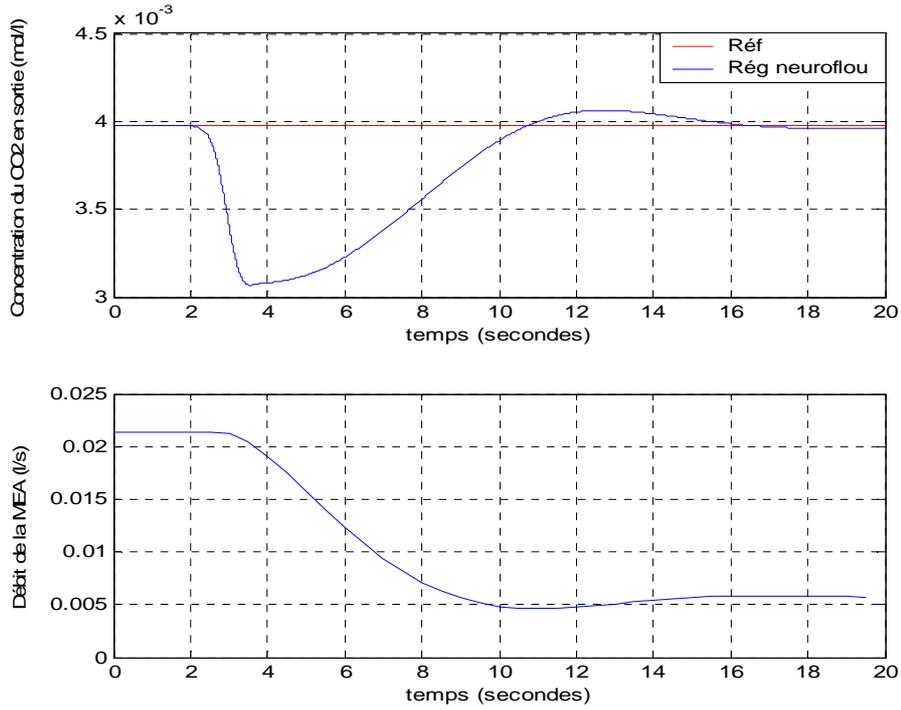


Figure III.22. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

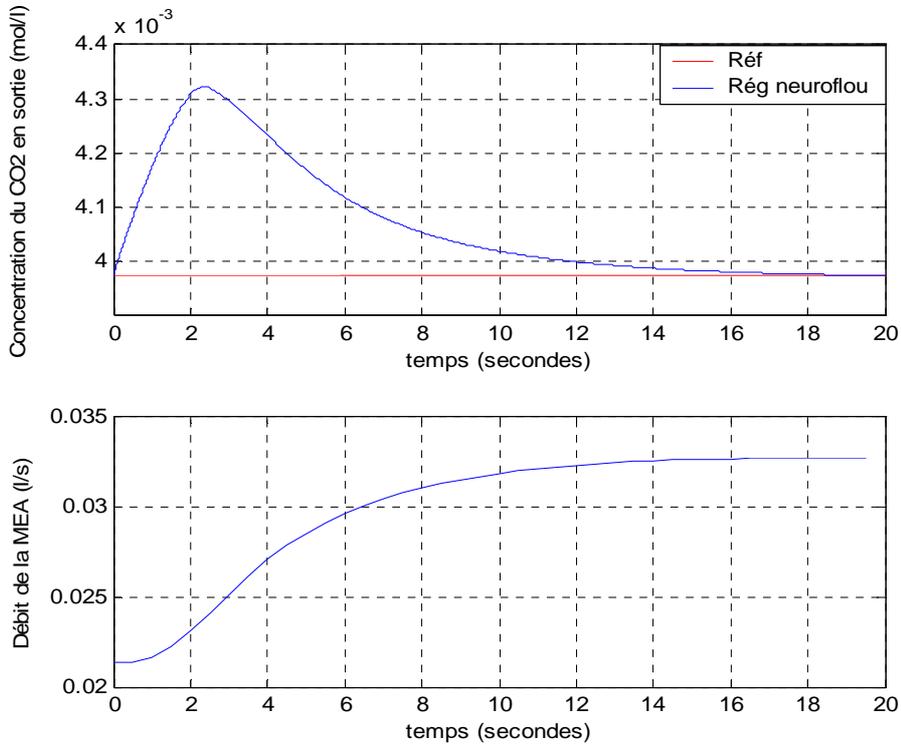


Figure III.23. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

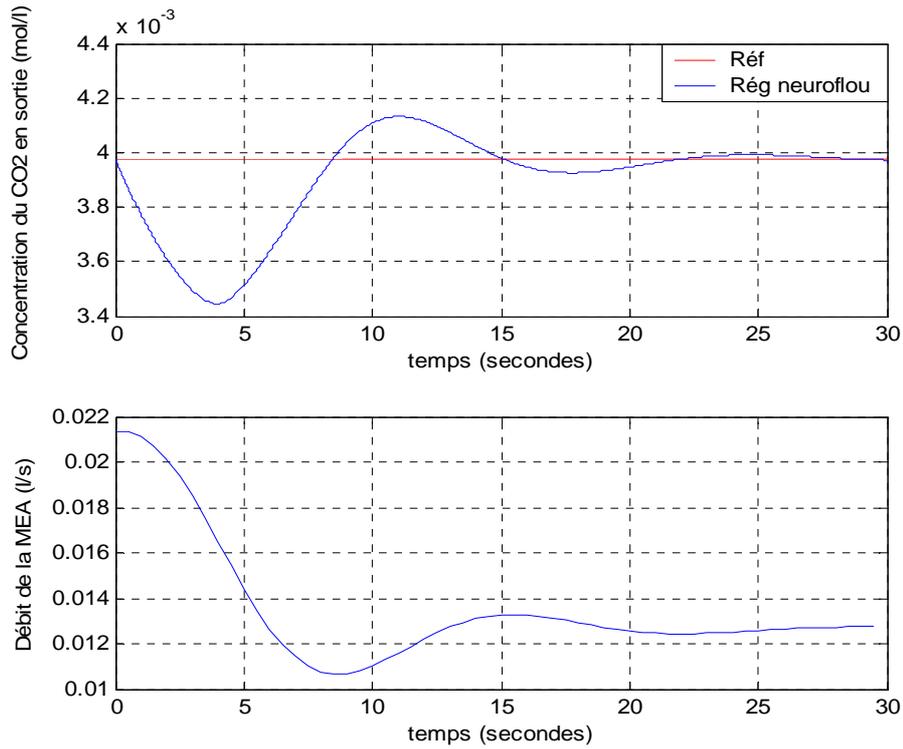


Figure III.24. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Influence de l'initialisation des poids

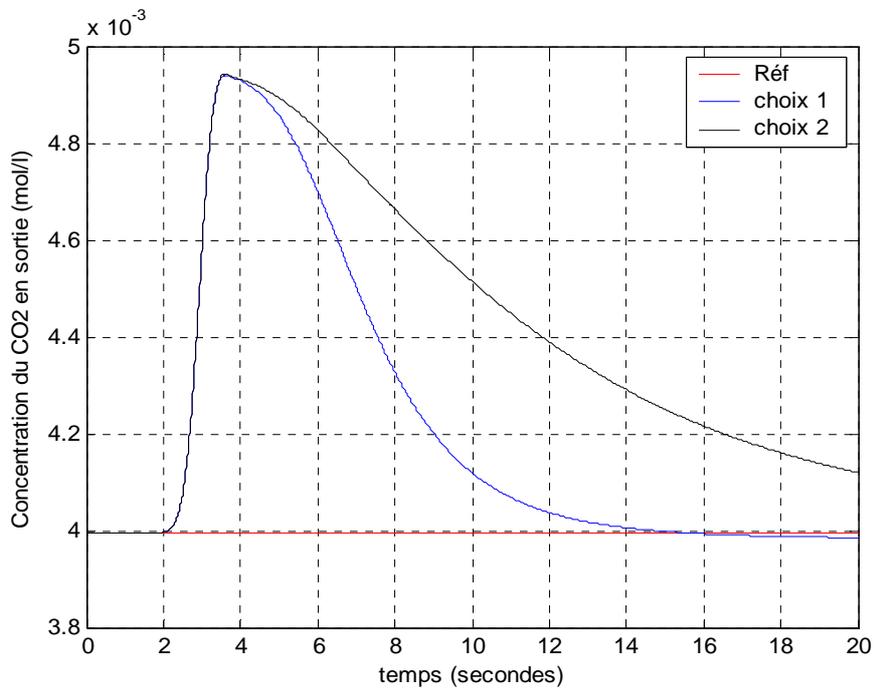


Figure III.25. Influence du choix de l'initialisation des poids sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

d. Variation de consigne

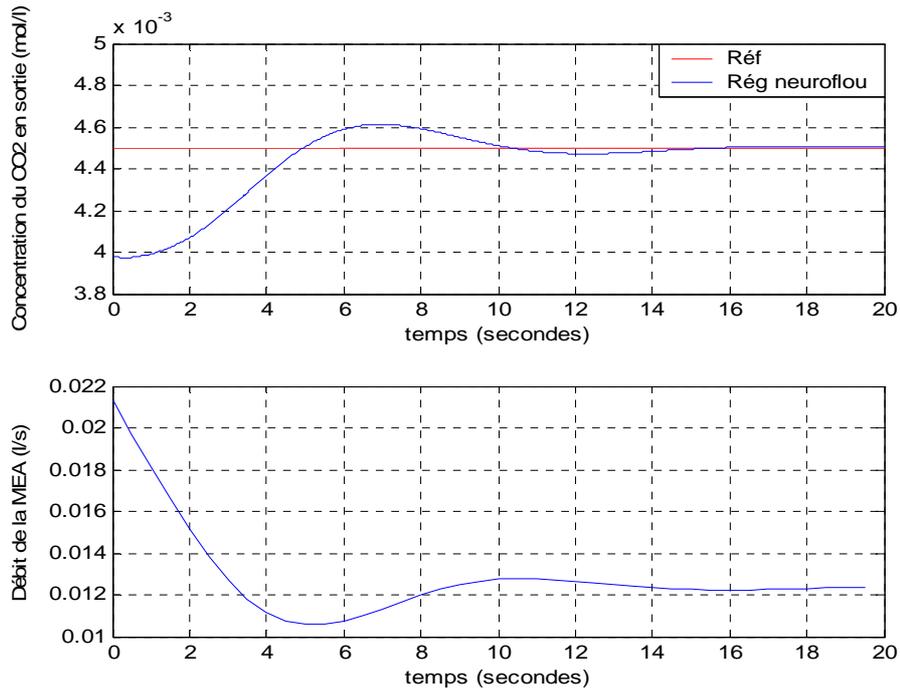


Figure III.26. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

2.2. Second point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

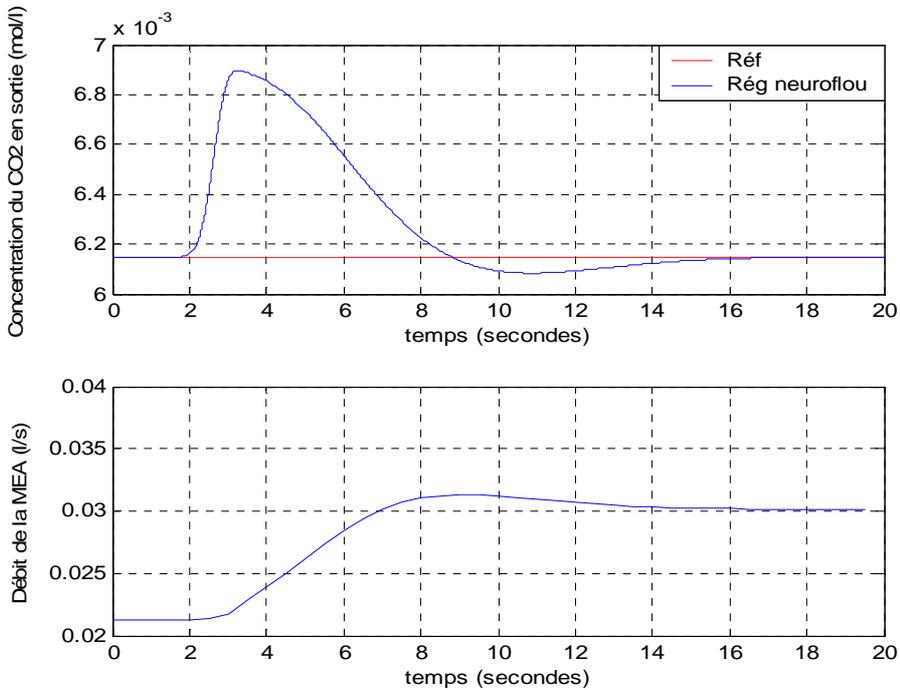


Figure III.27. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

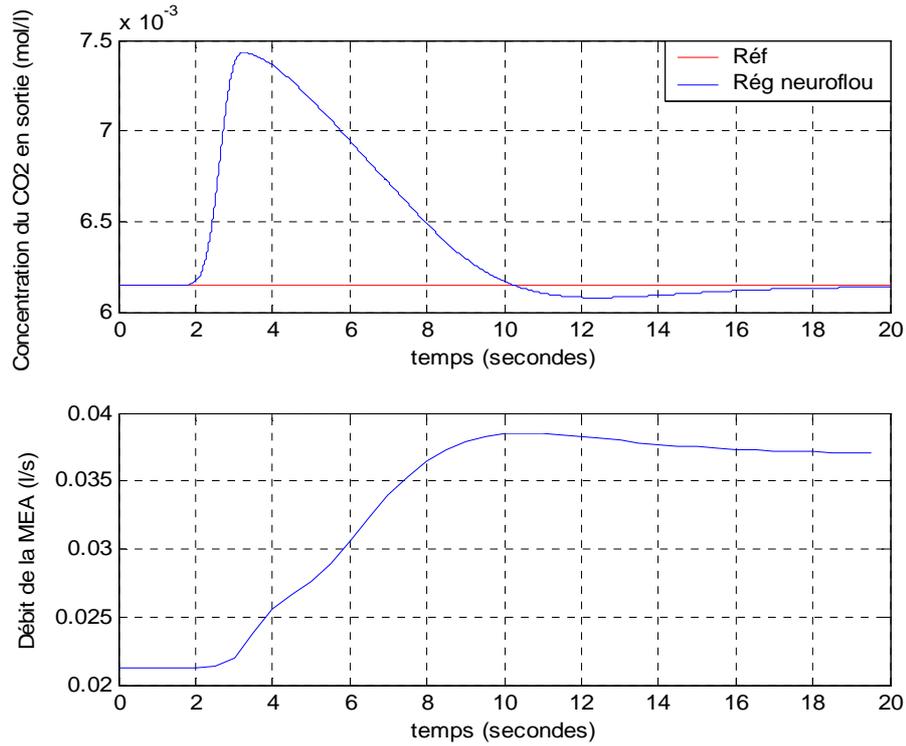


Figure III.28. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

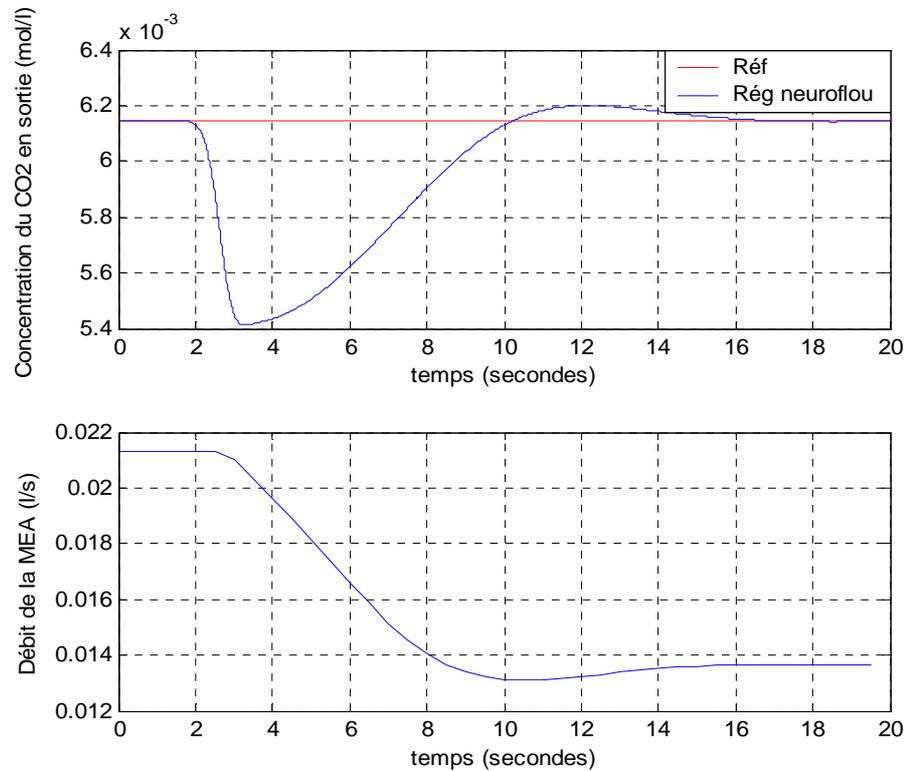


Figure III.29. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

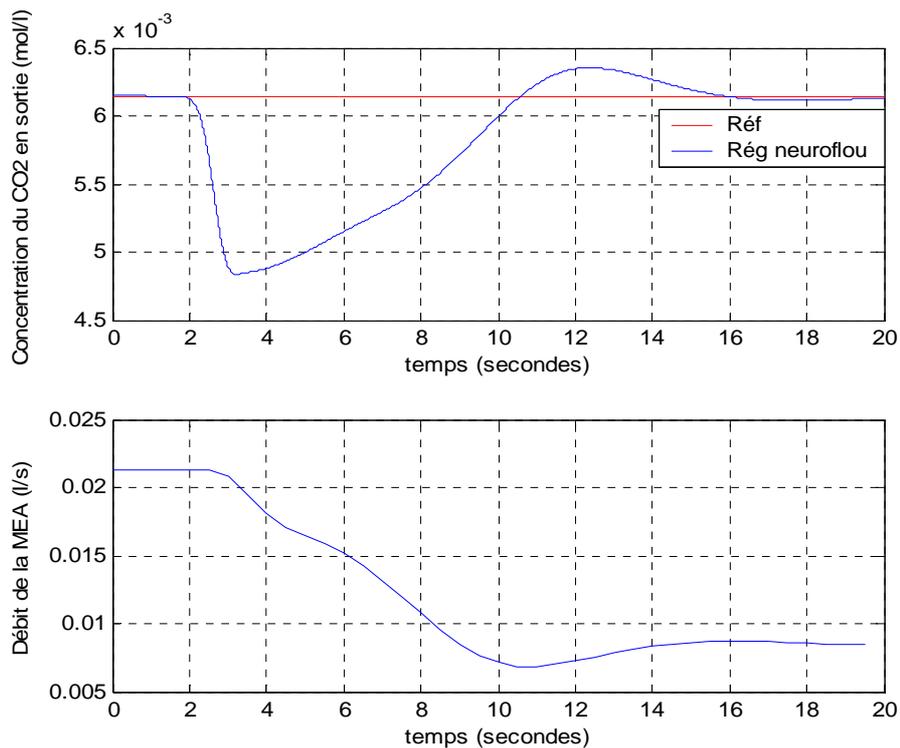


Figure III.30. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

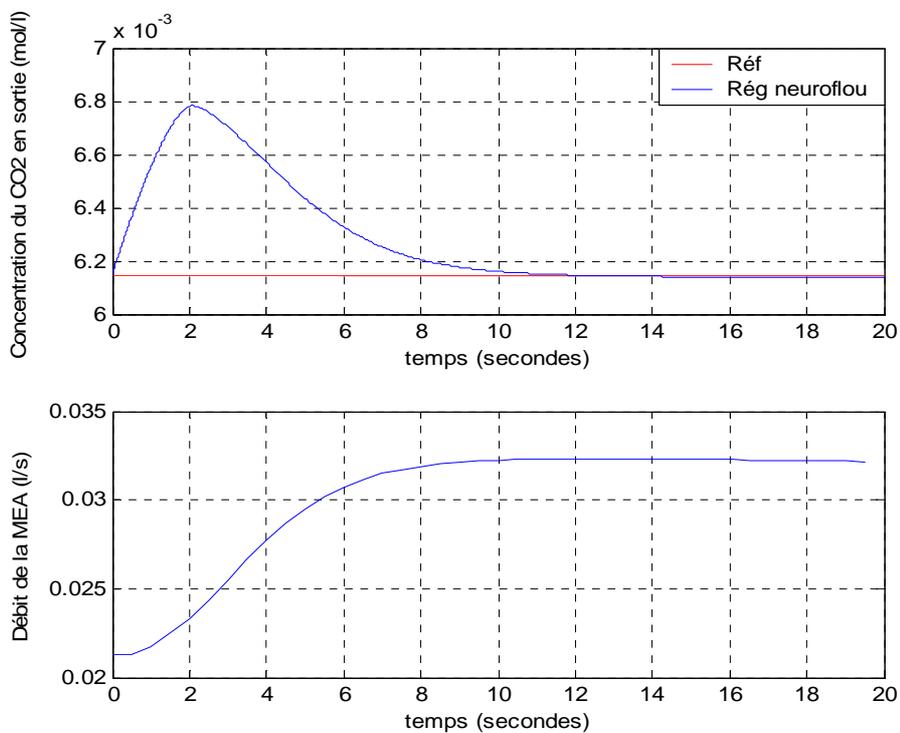


Figure III.31. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

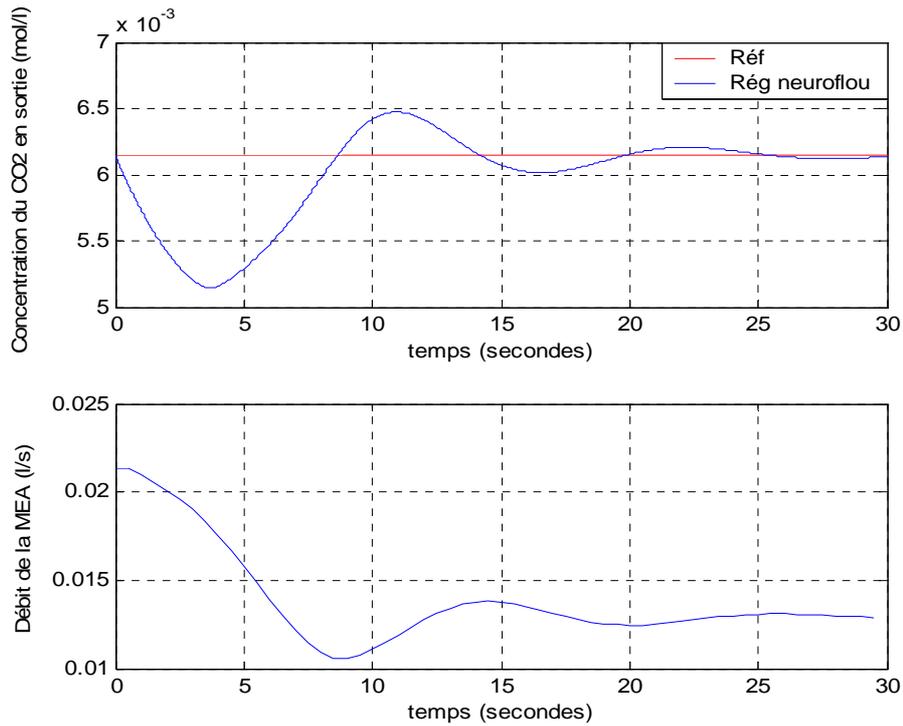


Figure III.32. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

c. Influence de l’initialisation des poids

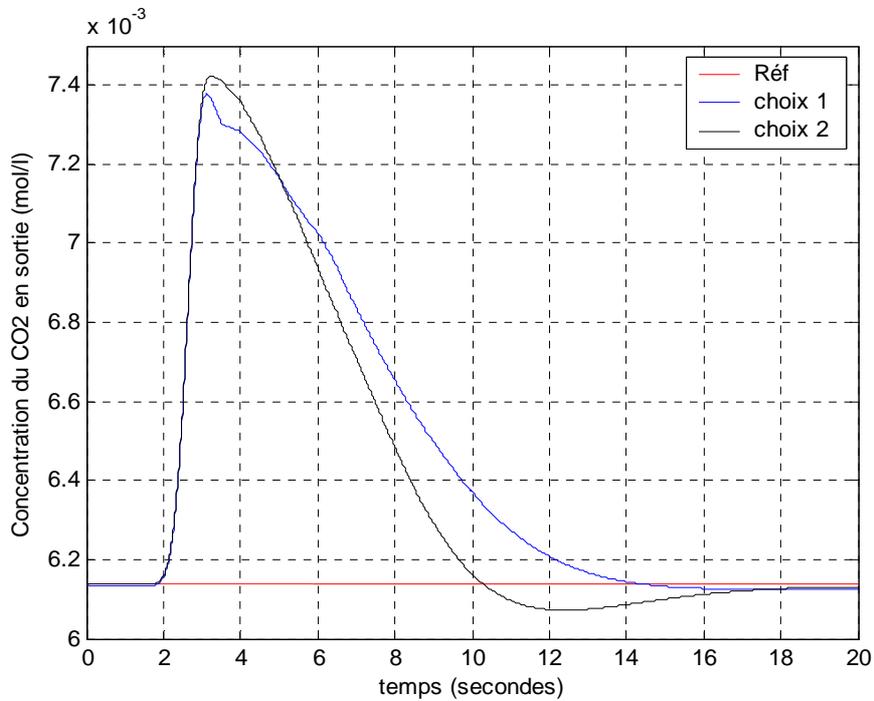


Figure III.33. Influence du choix de l’initialisation des poids sur la sortie pour un échelon de perturbation de +20% sur la concentration de CO₂

d. Variation de consigne

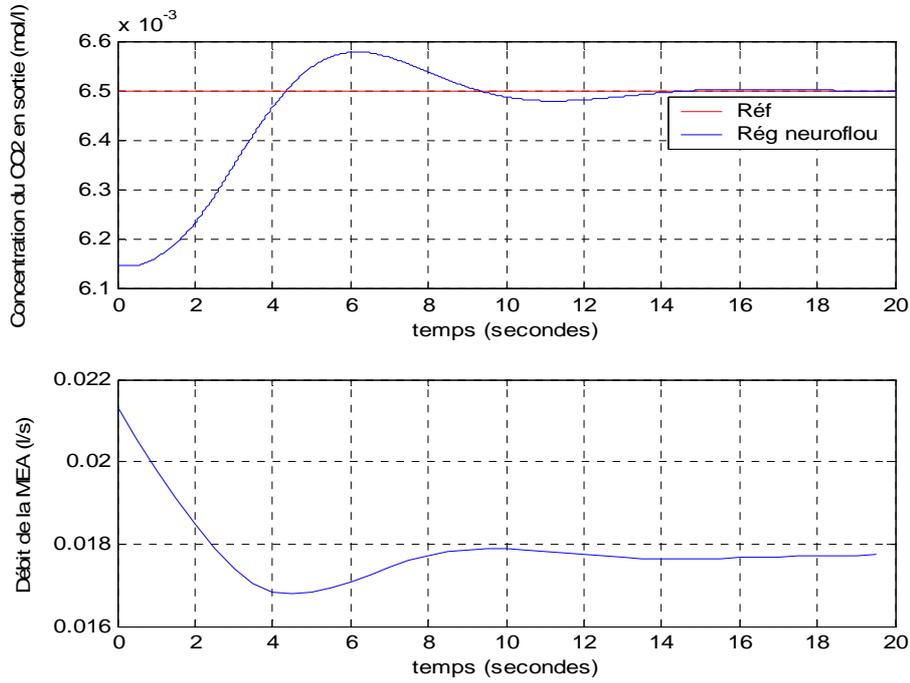


Figure III.34. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

3. Commande L.E.S.D.F

3.1. Premier point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

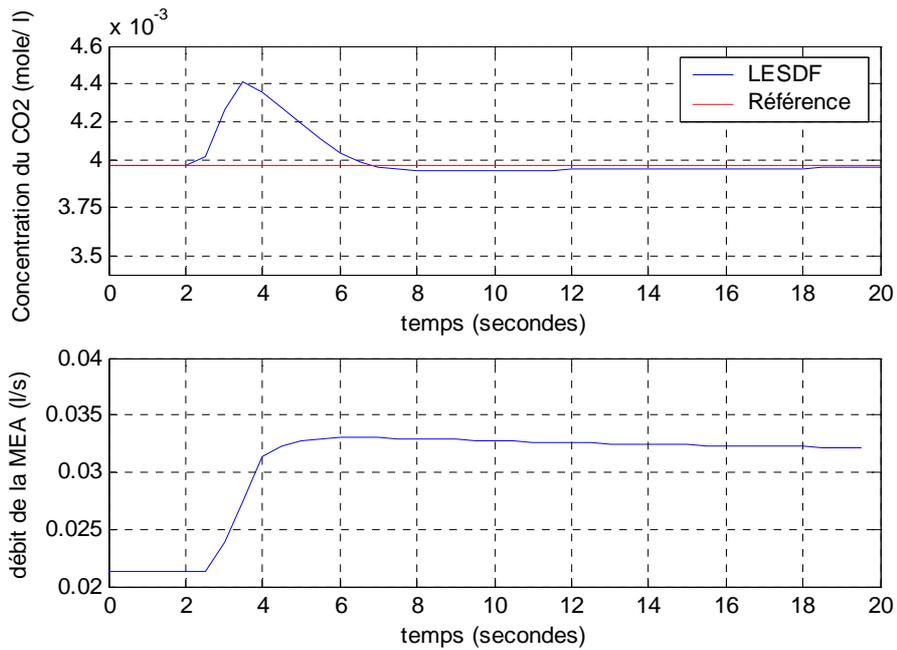


Figure III.35. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage

pour un échelon de perturbation de +10 %

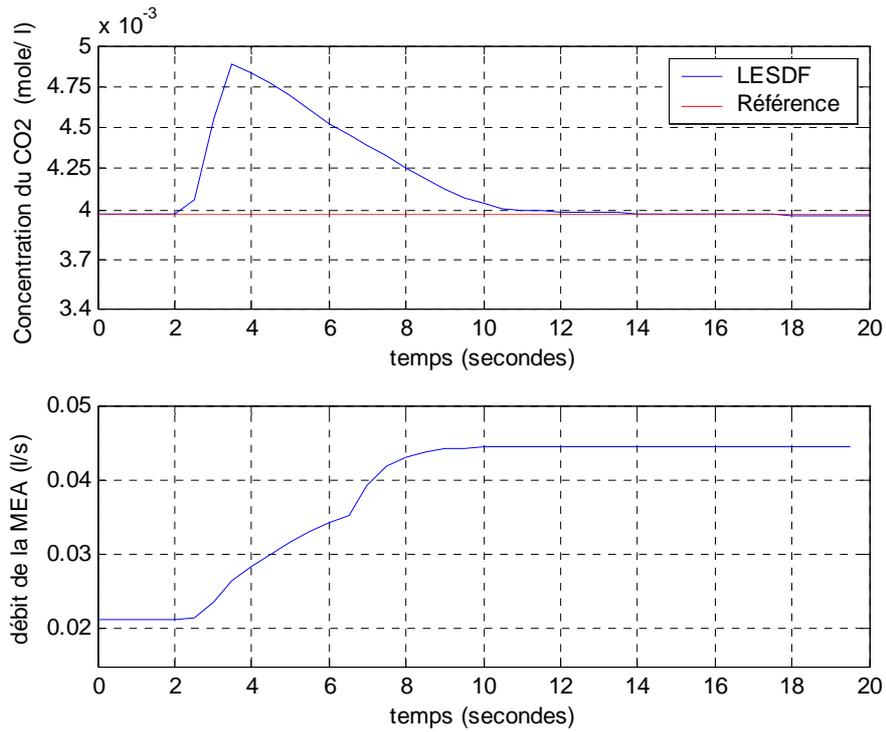


Figure III.36. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

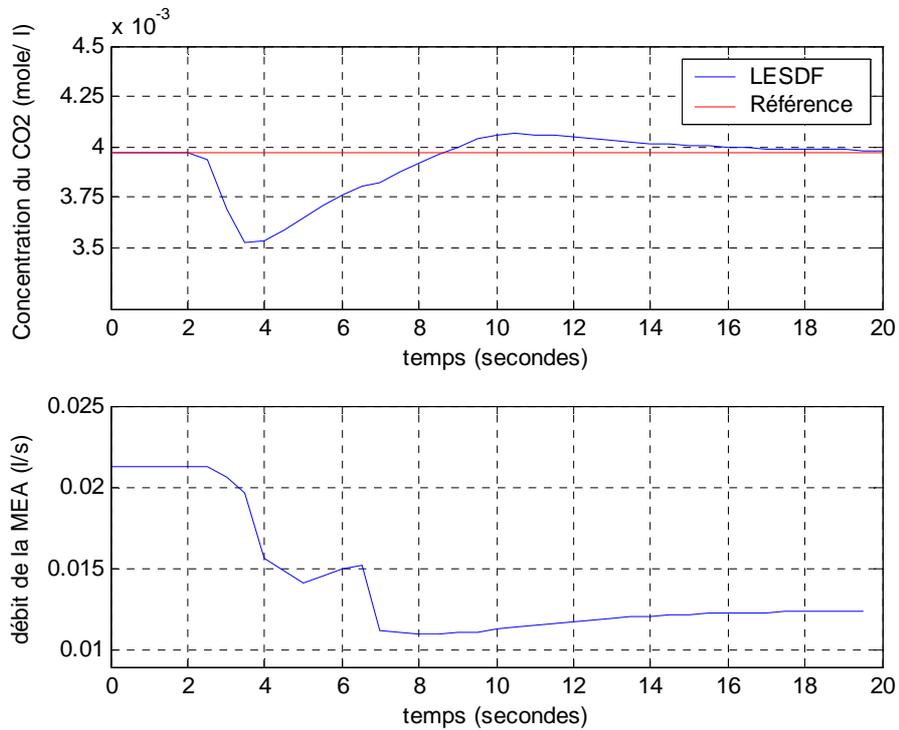


Figure III.37. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

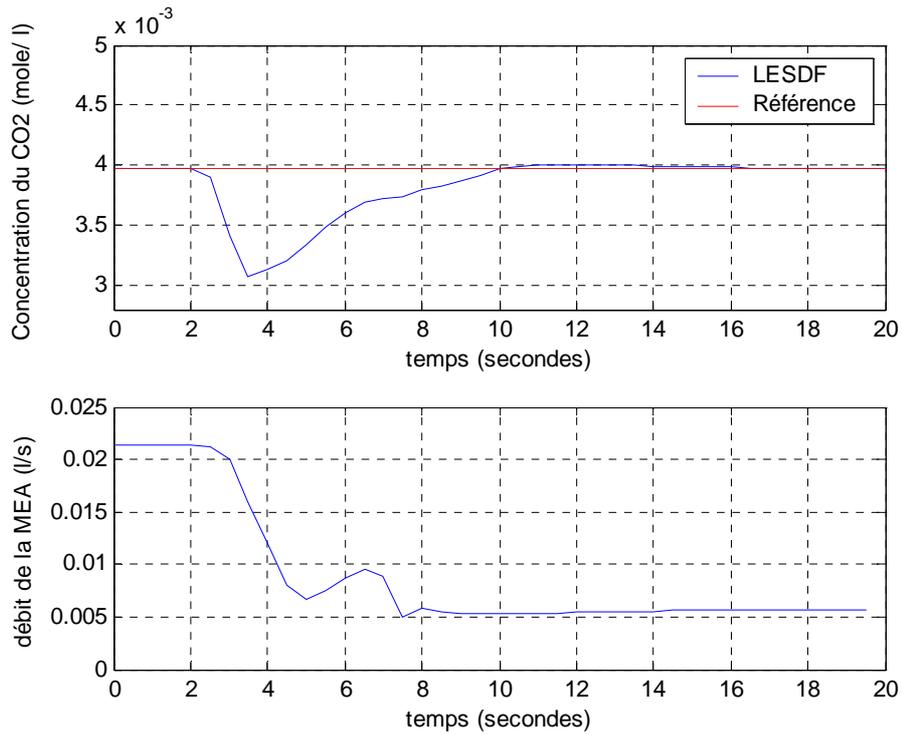


Figure III.38. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

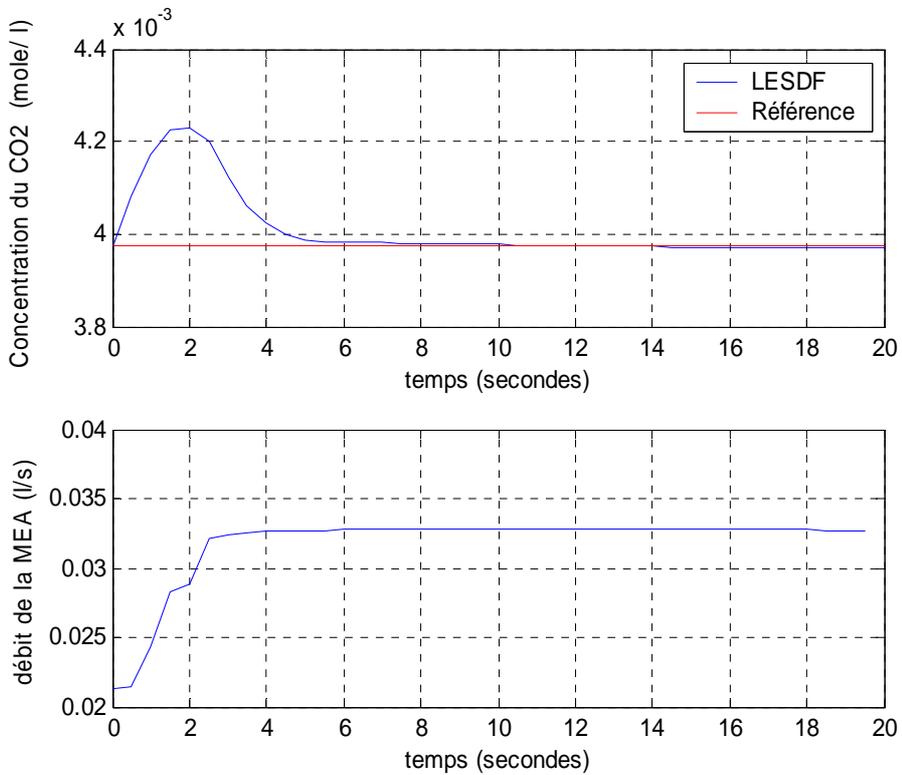


Figure III.39. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

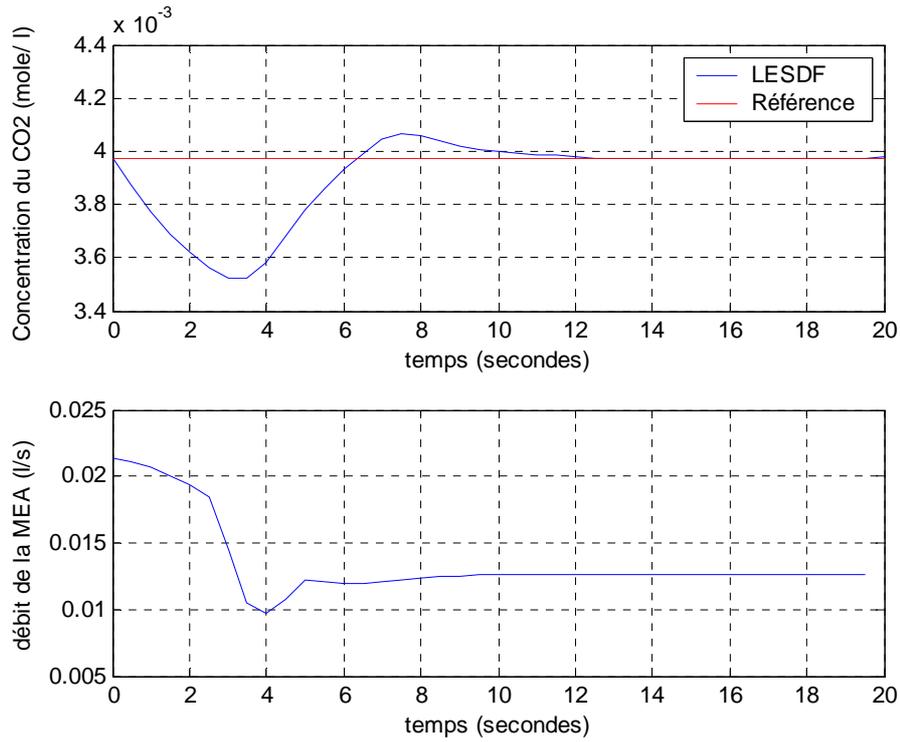


Figure III.40. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

d. Variation de consigne

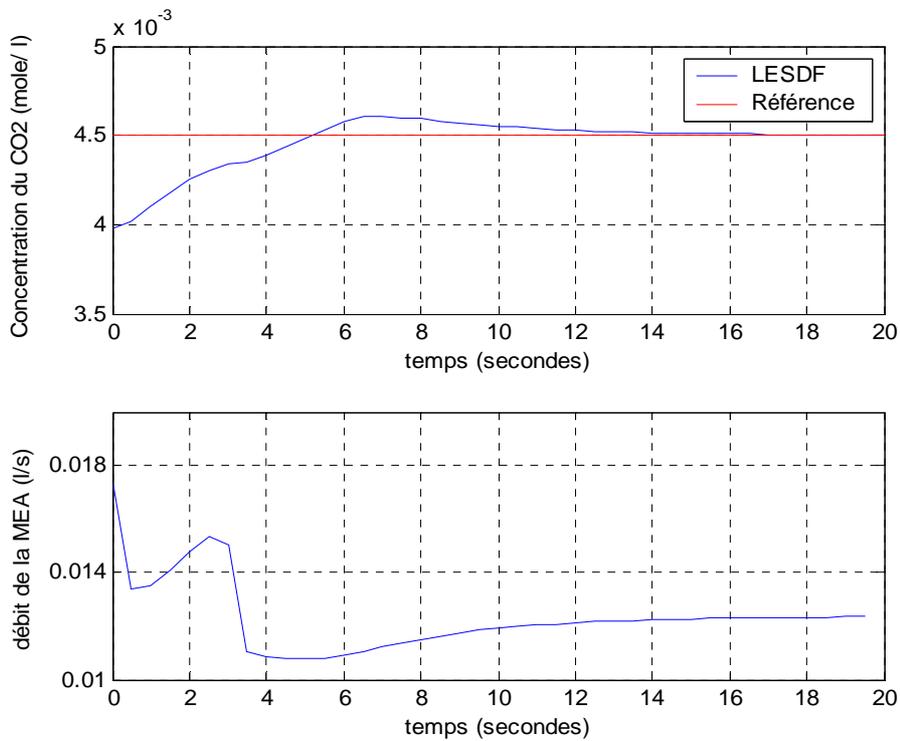


Figure III.41. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $3.975 \cdot 10^{-3}$ à $4.5 \cdot 10^{-3}$

3.2 .Second point de fonctionnement

a. Echelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée

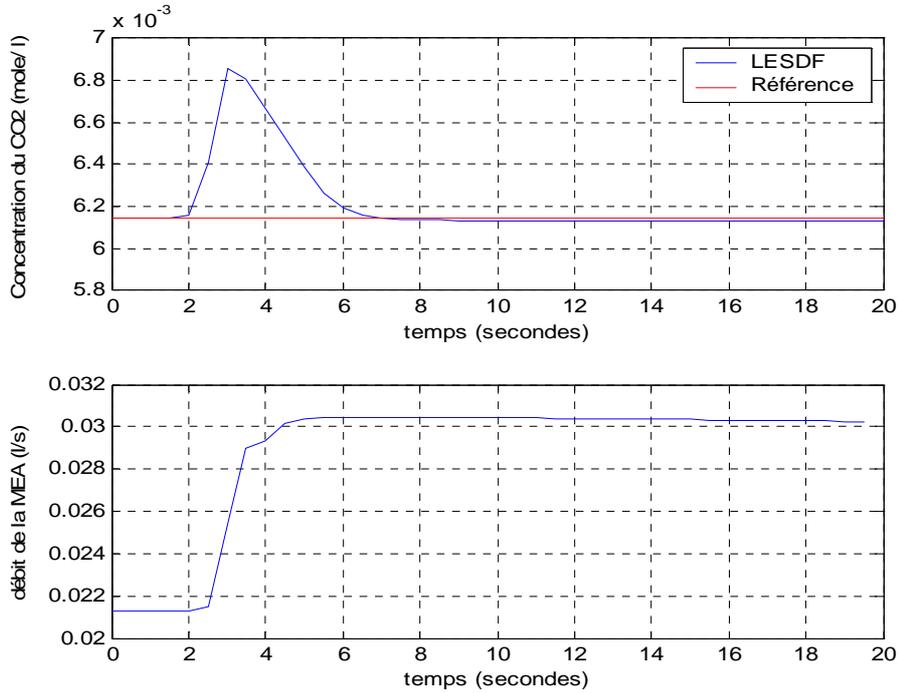


Figure III.42. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +10 %

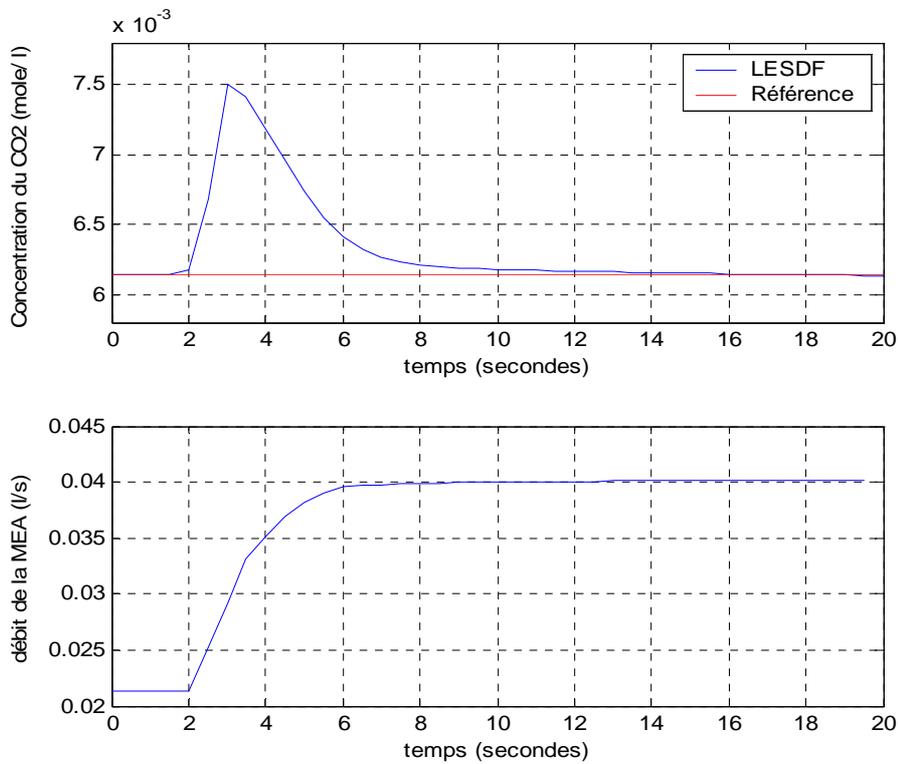


Figure III.43. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +20 %

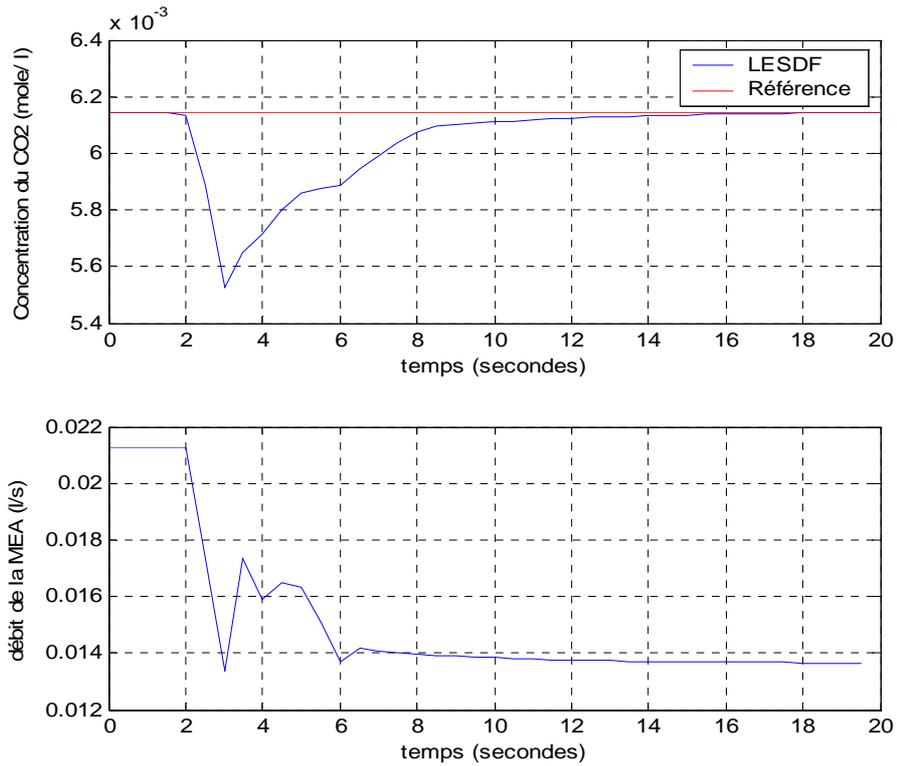


Figure III.44. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -10 %

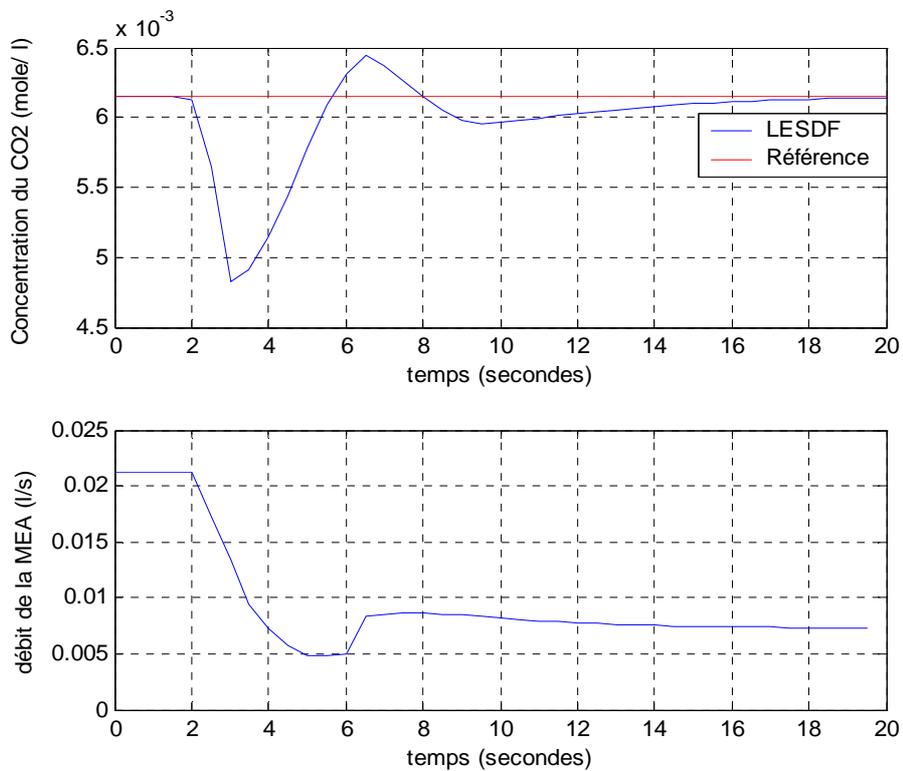


Figure III.45. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -20 %

b. Echelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée

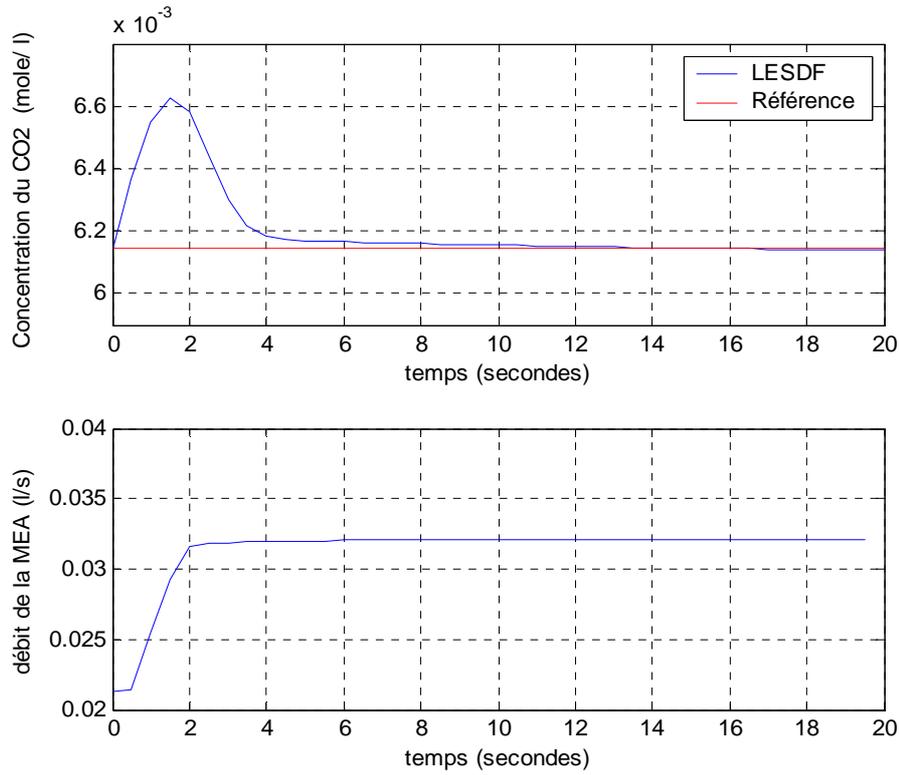


Figure III.46. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de +30 %

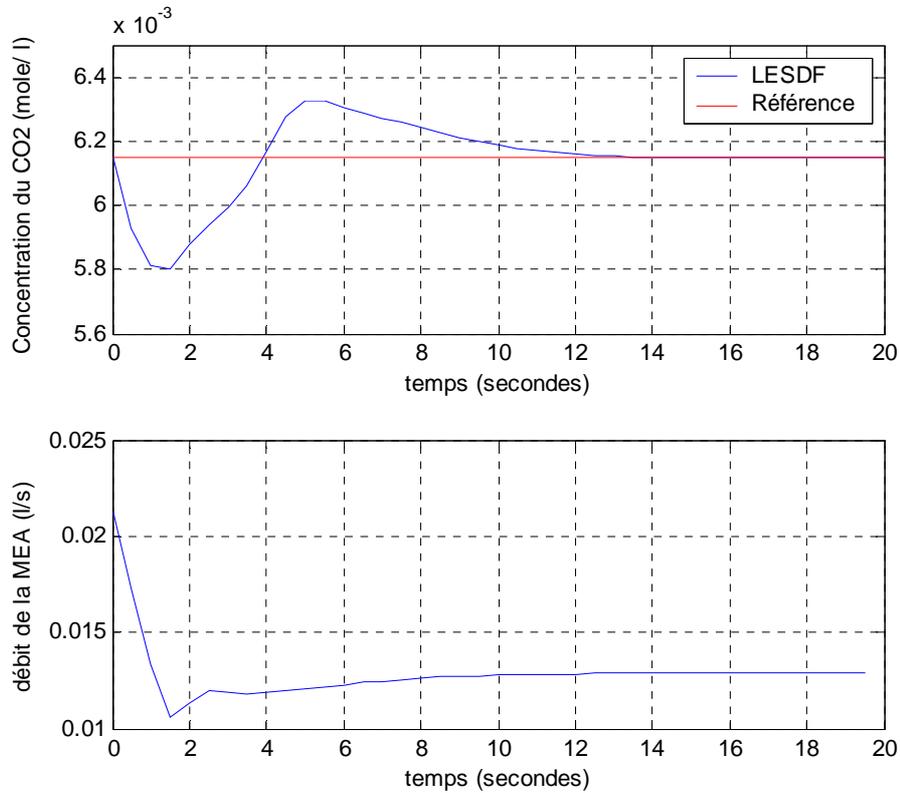


Figure III.47. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour un échelon de perturbation de -30 %

d. Variation de consigne

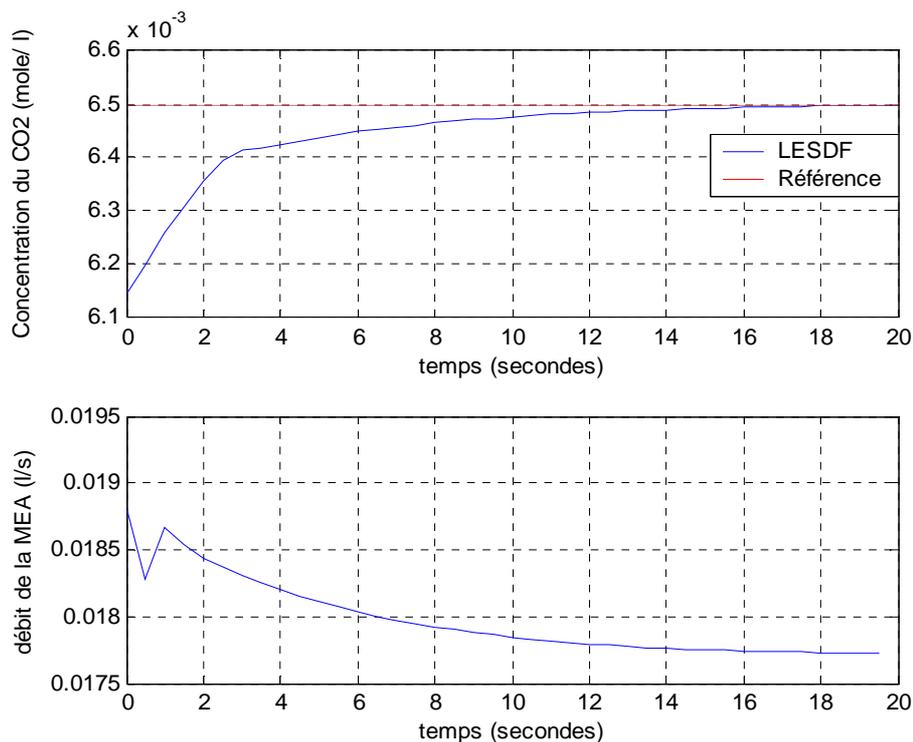


Figure III.48. Concentration en sortie du CO₂ et débit du liquide de lavage pour une variation de consigne de $6.147 \cdot 10^{-3}$ à $6.5 \cdot 10^{-3}$

III.4. Interprétation des résultats

Régulateur flou

Les figures (III.3.....III.10.) montrent l'évolution de la concentration de CO₂ en haut de la colonne ainsi que la commande pour différents niveaux de perturbation sur la concentration et le débit de CO₂ à l'entrée de celle-ci. On remarque que la sortie converge rapidement vers la consigne et le régulateur synthétisé est robuste par rapport aux perturbations. Pour une variation de consigne, le régulateur réagit correctement et la sortie converge vers la nouvelle sortie désirée.

Pour ce qui est de l'influence de la taille de la base des règles sur la sortie, nous avons effectué des essais et cela pour trois bases de règles de 49, 25 et 9 règles floues. On voit clairement qu'une diminution de la taille de la base des règles entraîne une diminution des performances du régulateur flou, ce qui est logique car l'augmentation de la taille de la base des règles augmente la précision du système.

On remarque également que les temps de réponse sont plus courts et moins sensibles au signe des perturbations que pour le régulateur PI.

Régulateur neuro flou adaptatif

De même que pour le régulateur flou, le régulateur neuro-flou adaptatif assure toujours la stabilité du système et donne de bons résultats du point de vue de la rapidité de la

convergence de la sortie vers la consigne, ainsi que pour la robustesse par rapport aux perturbations et à la variation de la consigne.

Les résultats obtenus pour le régulateur neuro flou adaptatif se rapprochent de ceux obtenus avec la régulation floue ce qui est logique car ils sont équivalents par la structure et les fonctions utilisées. Les performances du régulateur neuro-flou adaptatif sont évidemment moins bonnes car il doit adapter en ligne les conclusions des règles alors que le comportement du régulateur flou est quasi optimal car nous avons effectué de nombreux essais avant d'obtenir les paramètres finaux.

Commande L.E.S.D.F

Selon la théorie développée précédemment, nous avons synthétisé un régulateur discret flou qui se base sur les propriétés structurelles des systèmes et répondre aux objectifs de commande en régulation.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, les réponses du système pour les perturbations sur la concentration de CO_2 à l'entrée sont rapides, et la sortie converge vers zéro grâce au régulateur intégrateur de fin de course. Pour ce qui est des perturbations sur le débit de gaz en entrée, les performances obtenues sont bien meilleures que pour les régulations déjà développées et cela aussi bien du point de vue temps de réponse que stabilité (élimination des oscillations).

III.5. Comparaison entre les différentes techniques de commande

1. Régulateur PI et régulateur flou

Cas de l'échelon de perturbation sur la concentration de gaz en entrée :

On remarque que pour les temps de réponse, les résultats obtenus avec le régulateur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec le régulateur PI pour les deux points de fonctionnement et ceci aussi bien pour les perturbations positives que négatives. En effet, pour un échelon de perturbation de +10% et pour le premier point de fonctionnement la réponse est de 13s pour le régulateur flou, alors que pour le PI, elle est de 20s, pour le second point de fonctionnement, elle passe de 13s pour la régulation PI à 9s avec la régulation floue, ce qui est assez important.

On note également que la régulation floue apporte une certaine homogénéité entre les réponses pour les perturbations positives et négatives. En effet, pour un échelon de perturbation de +/- 20% la réponse obtenue avec la régulation PI est respectivement de 25s et 14s pour le premier point de fonctionnement et de 13s et 11s pour le second point de fonctionnement, alors qu'avec la régulation floue, les réponses sont respectivement de 16s et 14s pour le premier point de fonctionnement et de 11s et 12s pour le second.

Cas de l'échelon de perturbation sur le débit de gaz en entrée :

On remarque que du point de vue temps de réponse, la régulation floue donne de meilleurs résultats pour les échelons de perturbation positifs, mais que ceux-ci sont légèrement dégradés pour les perturbations négatives pour les deux points de fonctionnement. En revanche, on voit bien l'effet de la commande floue sur l'homogénéité des résultats pour le premier point de fonctionnement, puisque pour un échelon de perturbation de +/- 30 % les réponses du

régulateur PI sont respectivement 29s et 14s, alors que pour le flou, elles sont de 19s et 20s ce qui est plus homogène.

2. Régulateur flou classique et la L.E.S.D.F.

Les deux stratégies de commande floues, que ce soit la régulation classique ou la L.E.S.D. répondent aux objectifs de commande et donnent des résultats satisfaisants. Cependant, la L.E.S.D.F. donne de meilleurs résultats que la commande floue pour les échelons de perturbation sur la concentration de gaz en entrée positifs, mais les réponses sont légèrement dégradées pour les perturbations négatives.

L'avantage net de la L.E.S.D.F. par rapport à la régulation floue se situe pour les réponses pour à des perturbations sur le débit de gaz. Celles-ci sont en effet plus rapides et plus homogènes, elles passent pour un échelon de perturbation de +/- 30% de 19s-20s et 14s-24s respectivement pour le premier et second point de fonctionnement pour le régulateur flou à 10s-12s et 11s-13s pour la L.E.S.D.F. De plus, la L.E.S.D.F. a un effet stabilisant car les oscillations présentes pour la régulation floue ont nettement diminué.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois techniques de commande basées sur la logique floue à une colonne d'absorption pilote et ce pour assurer des objectifs de régulation.

Dans l'approche floue classique, nous avons travaillé avec des fonctions d'appartenance gaussiennes, et la taille de la base des règles est de 49 règles. Les figures obtenues montrent bien que cette commande est robuste vis-à-vis des perturbations extérieures et paramétriques. Elle réagit également correctement à une variation de consigne. De plus, les valeurs des commandes développées restent dans les limites admissibles. Nous avons également montré l'importance de la taille de la base des règles, puisqu'en diminuant la taille, les performances se dégradent.

Nous avons dû cependant procéder à plusieurs essais avec le régulateur flou avant d'obtenir des résultats corrects. Ceci peut être évité en utilisant un régulateur neuro-flou qui a la capacité d'adapter ses paramètres grâce à un algorithme d'apprentissage. Pour illustrer cette capacité d'apprentissage, nous avons utilisé le régulateur neuro-flou comme un régulateur adaptatif, les figures obtenues montrent sa stabilité et sa robustesse vis-à-vis des perturbations et ce malgré l'adaptation en ligne de ses paramètres. Les performances sont tout de même sensibles aux conditions initiales comme le montre les figures III. 25 et III.33.

La troisième commande est la commande L.E.S.D.F., elle repose sur les propriétés structurelles des systèmes flous de Takagi-Sugeno à conclusions constantes, et utilise des fonctions d'appartenance triangulaires pour pouvoir mettre le système sous une forme affine en la commande, et mettre en évidence une relation directe entre l'entrée du système (commande) et la sortie, et donc de synthétiser une commande par modèle inverse. La commande utilisée a donné des résultats satisfaisants surtout pour ce qui est de la réponse aux échelons de perturbations sur le débit de gaz. Nous avons d'abord identifié les paramètres du système (conclusions des règles) en appliquant la méthode d'identification batch. Puis, nous avons appliqué la commande L.E.S.D.F. développée précédemment à notre système. Nous avons également rajouté un intégrateur de fin de course pour pouvoir annuler l'erreur due aux

incertitudes sur l'identification ou à la modélisation. Les résultats de simulation montrent bien l'efficacité de la loi de commande pour la régulation.

Pour conclure, il est difficile de faire une comparaison du point de vue performance entre les résultats obtenus par les différentes techniques de commandes appliquées, car les trois commandes développées répondent aux objectifs de commande et donnent des résultats satisfaisants. Mais ce que l'on peut constater, c'est que la régulation floue améliore nettement les résultats obtenus avec une simple régulation PI du point de vue temps de réponse mais également celui de l'homogénéité des réponses entre les perturbations positives et négatives.

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif d'appliquer des techniques de commande floues afin de répondre aux objectifs de robustesse pour la régulation d'une colonne d'absorption pilote à garnissage.

La commande des processus chimique n'est pas une tâche aisée car leur complexité les rend souvent difficiles à modéliser et à commander. Grâce à la simplicité d'implantation du PI, l'approche classique basée essentiellement sur la théorie des systèmes linéaires a obtenu un très grand succès dans les milieux industriels. Cependant, la nécessité d'atteindre de hautes performances a imposé la prise en compte de la dynamique globale non linéaire des processus dans la synthèse de la commande.

Dans le premier chapitre, nous avons développé un modèle mathématique dynamique décrivant le processus d'absorption de CO_2 dans une colonne à garnissage opérant à contre courant en se basant sur les principes fondamentaux du transfert de matière et les équations du bilan de matière. Le modèle obtenu est non linéaire aux dérivées partielles et prend en compte une réaction du deuxième ordre. Les relations décrivant le système ont pu être établies en considérant que $C_{BL}(x)$ n'était pas constante dans le sens transversal ni le long de la colonne. Puis, nous avons utilisé la fonction pdepe afin de pouvoir simuler le comportement dynamique de notre colonne.

Après avoir effectué plusieurs essais, nous avons montré que le modèle développé précédemment décrivait correctement le système réel, et ceci en faisant une comparaison entre les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus expérimentalement par le Laboratoire de Valorisation des Hydrocarbures de l'ENP ([SED04]). Nous avons élargi la vérification en travaillant avec deux températures distinctes (25°C et 40°C).

Les simulations numériques de la réponse à un échelon de perturbation pour différentes amplitudes que ce soit sur les concentrations ou bien sur les débits, nous ont permis d'étudier les différents aspects structurels de notre système ainsi que les propriétés de ce modèle, à savoir : stabilité en boucle ouverte, de nature non linéaire, et présence d'un temps mort sur les perturbations en concentration dû à la propagation du gaz le long de la colonne d'absorption. Les simulations mettent également en évidence la dynamique très lente de la concentration de la MEA et sa faible influence sur la concentration de CO_2 .

Nous avons ensuite appliqué une régulation PI à notre système, et ce dans le but de comparer les résultats donnés par une approche classique de commande avec ceux donnés par des approches avancées telle que la logique floue. Les résultats obtenus en simulation sont satisfaisants, le régulateur PI prend en charge les perturbations sur les concentrations et le débit. Mais nous constatons que le système présente en régulation PI un très net 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.

Dans le deuxième chapitre, nous avons commencé par présenter les notions de base de la théorie de la logique floue, la représentation d'un régulateur flou et de ses différents constituants, ainsi que l'application de la logique floue dans la commande. Puis, nous nous sommes intéressés à la stratégie de commande neuro-floue. Cette dernière repose sur la

combinaison des avantages qu'offrent les régulateurs flous et neuronaux afin d'introduire des capacités d'autorégulation et d'adaptation dans les systèmes flous. Le régulateur flou est implémenté par un réseau connexionniste à quatre couches, et possède la capacité d'adaptation de ses paramètres en temps réel grâce à un algorithme d'apprentissage, qui est ici l'algorithme de rétropropagation du gradient.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons présenté la commande LESDF qui repose sur les propriétés structurelles des systèmes flous de Takagi-Sugeno à conclusion constante et utilise des fonctions d'appartenance triangulaires.

Nous avons montré que la sortie globale d'un système flou est égale à la sortie générée par un sous système flou défini sur chaque maille floue élémentaire. Cette propriété permet de faciliter l'étude des systèmes flous complexes en les étudiant sur chaque sous système. De plus, sur une maille élémentaire, l'approximation par Takagi-Sugeno revient à l'approximation par une fonction affine en chacune des entrées. L'inversion du modèle flou peut alors être réalisée sous réserve que le système soit à phase minimale.

Dans le dernier chapitre, nous avons appliqué trois techniques de commande basées sur la logique floue à une colonne d'absorption pilote. Nous avons présenté les résultats de simulation obtenus par l'application des stratégies de commande floue, neuro-floue, et la L.E.S.D.F. exposées dans le chapitre II pour deux différents points de fonctionnement de la colonne d'absorption pilote et ce pour différentes perturbations intervenant sur la concentration de CO₂, le débit de gaz en entrée ainsi qu'une variation imposée de consigne.

Dans l'approche floue classique, nous avons travaillé avec des fonctions d'appartenance gaussiennes. Les figures obtenues montrent bien que cette commande est robuste vis-à-vis des perturbations extérieures et paramétriques. Elle réagit également correctement à une variation de consigne. De plus, les valeurs des commandes développées restent dans les limites admissibles. Nous avons également montré l'importance de la taille de la base des règles, puisqu'en diminuant la taille, les performances se dégradent.

Nous avons dû cependant procéder à plusieurs essais avec le régulateur flou avant d'obtenir des résultats corrects. Ceci peut être évité en utilisant un régulateur neuro-flou qui a la capacité d'adapter ses paramètres grâce à un algorithme d'apprentissage.

Pour illustrer cette capacité d'apprentissage, nous avons utilisé le régulateur neuro-flou comme un régulateur adaptatif, les figures obtenues montrent sa stabilité et sa robustesse vis-à-vis des perturbations et ce malgré l'adaptation en ligne de ses paramètres.

La troisième commande est la commande L.E.S.D.F., elle repose sur les propriétés structurelles des systèmes flous de Takagi-Sugeno à conclusions constantes, et utilise des fonctions d'appartenance triangulaires pour pouvoir mettre le système sous forme affine en la commande et mettre ainsi en évidence une relation directe entre l'entrée du système (commande) et la sortie, afin de synthétiser une commande par modèle inverse. La commande utilisée a donné des résultats satisfaisants surtout pour la réponse aux échelons de perturbations sur le débit de gaz. Nous identifions d'abord les paramètres du système (conclusions des règles) par la méthode d'identification batch valable pour les systèmes linéaires en paramètres. Puis nous appliquons la commande L.E.S.D.F. développée à notre système. Afin d'annuler les erreurs dues aux incertitudes sur l'identification et la modélisation, nous substituons en fin de course un intégrateur. Les résultats de simulation montrent bien l'efficacité de la loi de commande pour la régulation.

Les simulations montrent que malgré la complexité de notre système non linéaire et à paramètres répartis, nous obtenons avec les stratégies de commande floues des performances très satisfaisantes et une grande robustesse par rapport aux perturbations sur la concentration de CO₂ à l'entrée de la colonne au débit de gaz.

On constate également que la régulation floue améliore nettement les résultats obtenus avec une simple régulation PI non seulement du point de vue du temps de réponse mais également pour celui de l'homogénéité des réponses avec les perturbations aussi bien positives que négatives.

A l'issue de ces travaux, cette thèse ouvre de nouvelles perspectives de recherche parmi lesquelles nous citons:

- L'extension de la modélisation à des colonnes d'absorption industrielles et le test des commandes développées à des systèmes réels.
- Des améliorations pourront être apportées en utilisant d'autres techniques de simulation des systèmes à paramètres répartis, comme par exemple celle de la collocation orthogonale
- Pour la linéarisation entrée-sortie discrète floue, les résultats pourraient être améliorés en augmentant le nombre d'entrées et le nombre de mailles à considérer par entrée.
- L'application d'autres stratégies de commande telles que la commande par mode de glissement ou la commande par réseaux de neurones est également à envisager.

Références bibliographiques

- [ABE02] S. Aberkane, D.BABA AMMI '*Commande neuro floue appliquée à une colonne d'absorption*', PFE, ENP, Alger, (2002).
- [BOU00] R. Boukezzoula, '*Commande floue d'une classe de systèmes non linéaires : application au problème de suivi de trajectoire*', Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, (2000).
- [BOU01] M.A. Boulrouah, '*Commande prédictive généralisée appliquée à une colonne d'absorption*', PFE, ENP, Alger, (2001).
- [BUH94] H. Buhler, '*Le réglage par logique floue*'. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, (1994).
- [CRO76] Crosby, J.E. et L.D. Durbin, '*Design and application of state variable feedback controller for a packed trickle bed column with carbon dioxide absorption*', Joint Automatic Control Conference, West Lafayette, IN (1976).
- [DAR80] Darwish, M. et J. Fantin, '*Stabilization and control of absorber tower chemical Process*'. Third IFAC/IFIP/IFORS Conference on System Approach for Development, Rabat (1980).
- [DOU06] J.C. Doukhan, Cours Polytech'Lille Sciences des Matériaux '*Défauts Cristallins*', Première année, (2006).
- [FRA74] Frank P.M., '*Entwurf von regelkreisen mit vorgeschriebenem verhalten*', Braun Verlag, pp. 234-245, Berlin, Allemagne, (1974).
- [HAD06] R. Haddouche, '*Simulation et Contrôle d'une Colonne d'absorption*'. Thèse de Magister, ENP, Alger, (2006).
- [HEN97] M.M. Heniche, '*Sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels et des systèmes flous pour la linéarisation et la commande de processus chimiques non linéaires*', Thèse de Magister, ENP, Alger, (1997).
- [HER94] J. Herault, C. Jutien, '*Réseaux de neurones et traitement du signal*', Edition Hermès, (1994).
- [IDE06] R. Idem, M. Wilson, P. Tontiwachwuthikul, 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, pp: 2414-2420, (2006).
- [IFP03] Conférence de presse de l'Institut Français du Pétrole, '*Réduction des émissions de CO₂ : les solutions*', IFP, France, (2003).

- [ILL02] Illoul, R., A. Selatnia, et A. Boulerouah, '*Commande Prédictive Généralisée d'une colonne d'absorption*', 4^{ème} Journées Francophones sur les Réacteurs Gaz-Liquide, Liège (2002).
- [ILL04] Illoul R, A. Selatnia, S. Aberkane et D. Baba Ammi, '*simulation de la commande par logique floue et neuro-floue d'une colonne d'absorption reactive*', 9^{ème} Congrès SFGP Saint-Nazaire, France, (2004).
- [ILT06] A. Ilten, A.A. Belaidi, '*Commande par logique floue et neuro floue d'une colonne d'absorption*', PFE, ENP, Alger, (2006).
- [ISI85] Isidori A., '*Nonlinear Control System: an Introduction*', Springer Verlag, Berlin, Allemagne, (1985).
- [ISI89] A. Isidori, '*Nonlinear Control Systems*'. Springer Verlag, New York, (1989).
- [JAG98] Jagannathan S., '*Adaptive Fuzzy Logic Control of Feedback Linearizable Discrete-Time Dynamical Systems Under Persistence Excitation*', Automatica, Vol. 34, No. 11, pp.1295-1310, (1998).
- [JAN93] J.R. Jang, '*ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system*'. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, (1993).
- [JAN95] J.S.R. Jang and C.T. Sun, '*Neuro fuzzy modelling and Control*', Proc. IEEE, vol 83, n° 3, pp 378-406, (1995).
- [KIS79] Kishinevskii, M.K., '*Theory and fundamentals of chemical engineering*'. Vol n°4, p 641 (1979).
- [LAB98] S. Labiod, '*Commande adaptative par les systèmes flous : application aux robots manipulateurs*'. Thèse de Magister, ENP, Alger, (1998).
- [LAB05] S. Labiod, '*Contribution à la Commande Adaptative Floue des Systèmes Non Linéaires*', Thèse de Doctorat, ENP, Alger, (2005).
- [LAN92] O. Landolt, P. Marchal et E. Vittoz (CSEM), '*Principes de la Logique Floue*', publication, MSM, n° 4, (1992).
- [LEE90] 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, pp. 404-435, (1990).
- [LEV92] Levin A.U., '*Neural Networks in Dynamical Systems*', Thèse de Doctorat, Yale University, Etats Unis, (1992).
- [LIU06] G. B. Liu, K. T. Yu, X. G. Yuan and C. J. Liu, '*New Model for Turbulent Mass Transfer and Its Application to the Simulations of a Pilot-Scale Randomly Packed Column for CO₂-NaOH Chemical Absorption*', *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 45, pp: 3220-3229, (2006).

- [MAR95] Marino R. and Tomei P., '*Nonlinear Control Design*', NJ: PrenticeHall, Englewood Cliffs, Etats Unis, (1995).
- [MAT6.5] Matlab Version 6.5, Release 13, (2002).
- [MEN95] J. M. Mendel, '*Fuzzy systems for engineering: A tutorial*'. *Proc. IEEE*, vol. 83, no.3, pp. 347-377, (1995).
- [NAJ91] Najim, K., '*Modelling and self-ajusting control of an absorption column*', *International Journal of AdaptiveControl and Signal Processing*, vol 5, pp. 335-345, (1991).
- [NAJ95] Najim, K. et V. Ruiz, '*Long range predictive control of an absorption packed column*', *Applied Mathematical Modelling Journal*, 19-1, pp. 39-45, (1995).
- [OLA04] O. A. Olafadehan, A. A. Susu, '*Modeling and Simulation of iquid- Phase Ternary Adsorption in Activated Carbon Column*', *Ind. Eng. Chem. Res*, vol 43, n°25, (2004).
- [PAS98] K.M. Passino and S. Yurkovich, '*Fuzzy Control*'. Addison-Wesley Longman Inc., (1998).
- [PET80] Petrovski , D., '*A design scheme fo multivariable output constrained PI regulators with applications to absorption column*', *Automatic Control Theory Applications*, 8, pp. 61-69, (1980).
- [PIN84] D.Pinglot, '*Commande optimale et sous optimale d'un système hyperbolique non linéaire : colonne d'absorption*', Thèse de Doctorat, Toulouse, France, (1984).
- [PIN93] Pintola T., P.Tontiwathwuthikul, et P.Melsen, '*Simulation of pilot plant and industrial CO₂-MEA absorbers Gas separation and purification*'. Vol.7, n°1, pp. 47-52, (1993).
- [RAY81] Ray, W.H. '*Advenced Process Control*', McGraw-Hill Chemical Enganeering Series, Vol. 376, McGraw-Hill. Montréal, (1981).
- [RAP01] P.Rapin, J.C. Lachat, '*Equations aux dérivées partielles*', *Techniques de l'ingénieur*, (2001).
- [ROF76] Roffel, B., '*Control of processes with a state variable inequality constraint*', *Journal A*, Vol 17, pp. 19-28, (1976).
- [SAA96] Saari H., '*Commande répétitive de procédés échantillonnés à déphasage non minimal*', Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, (1996).
- [SAI96] Saidi L., '*Commande à modèle interne: inversion et équivalence structurelle*', Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France(1996).

- [SAS89] Sastry S. and Bodson M. '*Adaptive Control, Stability, Convergence and Robustness*'. Prentice-Hall, Inc., (1989).
- [SED04] Seddari S., '*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).
- [SEL02] A. Selatnia, '*Communication au congrès sur les réacteurs polyphasiques*', Louvain, (2002).
- [SKE90] Skeel, R.D and Berzins, M. '*A method for the spatial discretization of parabolic equations in one space variable*', SIAM Journal Science. Statistical. Comput. Vol.11, N°1, pp.1-32 (1990).
- [SLO91] J.E. Slotine and W. Li, '*Applied nonlinear control*', Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, Etats Unis, (1991).
- [SOU95] Soussa J., Babuska R. and Verbruggen H.B., '*Adaptive Fuzzy Model-Based Control*', Proc. of the 3rd European Congress on Fuzzy Intelligent Technologies, pp. 865-869, Aachen, Allemagne, (1995).
- [TRA84] Trambouze P., H.V. Landegheim et J.P Wauquier,' *Les réacteurs chimiques, conception/ calcul/mise en œuvre*', Ed. Technip, (1984).
- [TID99] Z. Tidjani, '*Commande décentralisée floue appliquée aux robots manipulateurs*', Thèse de Magister, ENP, Alger, (1999).
- [TOM87] Tomizuka M., '*Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control*', ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 65-68, (1987).
- [TON92] Tontiwathwuthikul,P., P. Melsen et A. Linn '*CO₂ Absorption by NaOH, MEA and AMP solutions to paced columns*', Chemical Engineering Science, Vol. 47, n°2, pp. 381-390, (1992).
- [VAN76] R.Vander Weg, '*Modélisation et optimisation d'une colonne d'absorption*', Thèse de Doctorat, Toulouse, France, (1976).
- [VAN95] Vandergrift M., Lewis F.L., Jagannathan S. and Liu K., '*Adaptive Fuzzy Logic Control of Discrete Time Dynamical Systems*', Proc. IEEE Int. Conference on Intelligent Control, pp. 395-401, (1995).
- [VAN96] J.H.Van Der Psek, W.J.R Velthuis, P.H. Veltink and T.J. A. De Vries, '*Neuro-Fuzzy Control of the FES Assisted Swinging of Paraplegic Subjects*', Proc. 18th Int. Conf. IEEE Eng In Med. & Biol. Soc., Amsterdam, Pays Bas, (1996).
- [VEN02] A. N. Venkat, R. D. Gudi, '*Fuzzy Segregation Based Identification and Control of Nonlinear Dynamic Systems*', Ind. Eng. Chem. Res, vol 41, pp: 538-552, (2002).

- [VIL78] Villadsen, J. et Michelsen, M.L. '*Solution of differential equations modes by polynomial approximation*'. Prentice-Hall International series in the physical and chemical engineering sciences, Prentice Hall, Toronto, Canada, (1978).
- [WAN94] L.X. Wang, '*Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*'. Prentice-Hall, Englewood Clifs, NJ, Etats Unis, (1994).
- [WEC04] 19th World Energy Congress, Sydney, Australia, September 5-9, (2004).
- [ZAD65] L.Zadeh, '*Fuzzy sets*' *Information and Control*, Vol.8, (1965).
- [ZHA99] Y. Zhang, C. Wen and Y. Chai Soh. '*Robust Adaptive Control of Uncertain Discrete-Time Systems*'. *Automatica*, Vol. 35, pp 321-329, (1999).