

21/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DES ETUDES SUPERIEURES ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE  
FILIERE AUTOMATIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE

Thème

*Simulation et application  
de la commande adaptative à  
une colonne d'absorption*

Proposé et dirigé par :

Mr R. Illoul  
Mr A. Slatnia

Réalisé par:

Siousiou Hocine  
Babaousmail Moussa

PROMOTION 2003

## Remerciements

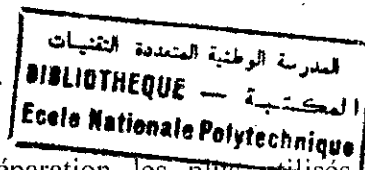
*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à nos promoteurs Mr. ILLOUL, Mr. SLATNIA pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée tout au long de notre travail et pour leur remarques, suggestions, et critiques constructives.*

*Nos remerciements vont également à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant notre travail et surtout pour la compréhension qu'ils nous ont témoignée.*

*Nous n'oublierons pas d'exprimer notre reconnaissance à RACHID Sioussiou SALAH et HABIB Babaousmail à nos collègues de génie chimique SALAH et KARIM et bien sûr notre meilleurs ami Tr. HAMID et à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin par leur expérience et leurs conseils judicieux.*

*Que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation reçoivent notre profonde gratitude.*

## Avant-propos



L'absorption est l'un des procédés de séparation les plus utilisés dans l'industrie chimique. Sa modélisation et sa commande ne sont pas des tâches faciles à réaliser, car il s'agit d'un procédé très complexe en raison de ses non-linearités, en outre, il est soumis à de nombreuses perturbations et à des contraintes.

Vu l'importance des procédés d'absorption dans l'industrie et les coûts d'opération causés en grande partie par l'énorme quantité d'énergie qu'il consomment, il est très important, d'un point de vue économique, de développer une stratégie de commande et d'optimisation qui permet d'améliorer l'efficacité des unités d'absorption existantes

La commande adaptative des systèmes a été, et reste jusqu'à présent, un domaine de recherche visant à résoudre des problèmes sur des systèmes très divers. Elle œuvre soit par l'extension de résultats théoriques, en allégeant progressivement les contraintes et en supprimant des hypothèses s'avérant parfois trop restrictives, soit par l'application de techniques connues et par les multiples combinaisons de celles-ci qui permettent de venir à bout d'incertitudes paramétriques ou structurelles sur des exemple d'application concrets auxquels se heurtent les industriels.

Dans notre projet on s'intéresse à étudier l'application de la commande adaptative sur le processus d'absorption de la colonne à garnissage. Deux phases circulent à contre courant dans cette colonne : une phase gazeuse comprenant du gaz carbonique (mélange air +  $\text{CO}_2$ ) et une phase liquide (eau + Monoéthanolamine, MEA). Le gaz épuré est récupéré en tête de cette colonne.

Le premier chapitre est consacré à la modélisation de la colonne. On développera étape par étape son modèle mathématique, à l'aide des lois fondamentales de la chimie.

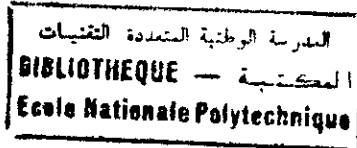
Le deuxième chapitre a pour objet la simulation du modèle, résultant du premier chapitre, et l'étude du comportement de la colonne vis-à-vis le débit du MEA (signal de commande) et la concentration en bas de la colonne (perturbation).

Le troisième chapitre concerne l'identification du système, par un modèle *ARX*, à l'aide du *MATLAB 6.1*, puis le simuler et le comparer avec le système non-linéaire. (étudier l'effet de l'identification).

L'objectif du quatrième chapitre est de présenter le développement et les différentes approches de la commande adaptative, puis l'implémentation de la commande à modèle de référence dans la colonne en utilisant différents algorithmes d'identification.

Finalement, le projet est clôturé par une conclusion générale où un récapitulatif des résultats les plus importants est fourni.

# Sommaire



## Chapitre I Modélisation de la colonne d'absorption

1. Caractéristiques et principe de fonctionnement de la colonne.....	1
2. Etude de la réaction chimique.....	2
3. Le bilan de matière en phase liquide .....	4
3.1 Calcul de flux d'absorption.....	4
4. La représentation mathématique de la colonne.....	7
5. Conditions aux limites.....	10
6. Conclusion.....	10

## Chapitre II Simulation de la colonne d'absorption

1. Les équations aux dérivées partielles (EDP).....	12
1.1. Généralités.....	12
1.2. Méthodes de résolution des EDP.....	14
1.2.1. La méthode des différences finies.....	14
1.2.2. La méthode des éléments finis.....	15
1.2.3. La méthode des volumes finis.....	16
1.2.4. La méthode des lignes.....	17
2. Simulation de la colonne d'absorption.....	17
2.1. Description de la fonction <i>pdepe</i> .....	17
2.2. Adaptation de l'équation de la colonne d'absorption à la fonction <i>pdepe</i> ....	19
2.3. Intégration du modèle de la colonne dans SIMULINK.....	21
2.3.1. Les blocs S-Function.....	21
2.3.2. Application à la colonne d'absorption.....	22
2.4. Mode opératoire et résultats.....	22
2.5. Interprétation .....	30
3. Conclusion.....	31

## III Identification de la colonne d'absorption

1. Généralités sur l'identification.....	32
1.1. Les entités de base de l'identification.....	32
1.1.1. L'enregistrement de données.....	32
1.1.2. La structure du modèle.....	33
1.1.3. Détermination du <i>meilleur</i> modèle.....	33
1.1.4 La validation du modèle.....	33
1.2. La boucle d'identification.....	33
1.3. Les méthodes d'identification.....	34
1.3.1. Les méthodes non-paramétriques.....	34
1.3.2. Les méthodes paramétriques.....	35
2. Identification de la colonne d'absorption.....	36
2.1. Fonctionnement du modèle de collecte des données.....	36

2.2. Identification à l'aide de l'outil Ident.....	37
3. Mode opératoire.....	38
4. Interprétations et commentaires.....	43
5. Conclusion.....	43

*IV Application de la commande adaptative sur la colonne d'absorption*

---

1. Historique.....	44
2. Les différentes techniques de la commande adaptative.....	45
2.1. Commande adaptative en boucle ouverte.....	45
2.2. Commande adaptative en boucle fermée.....	46
2.2.1. Commande adaptative à modèle de référence (Directe).....	46
2.2.2. Commande adaptative auto ajustable (indirecte).....	48
2.2.2.1. L'identification récursive de la commande adaptative....	49
2.2.2.2. Algorithme prototype de la commande adaptative indirecte.....	50
2.2.3. Commande adaptative duale.....	52
3. Application à la colonne d'absorption.....	53
3.1. Objectif de la commande.....	53
3.2. Commandes appliquées.....	53
3.3. Algorithme de commande.....	53
4. Résultats et interprétation.....	59
5. Conclusion.....	59

---

Conclusion générale.....	60
Annexe : Nomenclature.....	61
Références bibliographiques.....	62

## Chapitre I

# Modélisation de la colonne d'absorption

---

La modélisation de type génie chimique permet d'établir un modèle de procédé à partir des lois fondamentales de la physique et de la chimie telles que la conservation de la masse, le premier principe de la thermodynamique, les équilibres entre phases, les lois de transfert... Dans leur formulation la plus générale, ceux-ci s'écrivent:  $(ce\ qui\ rentre) + (ce\ qui\ se\ crée) = (ce\ qui\ sort) + (ce\ qui\ s'accumule)$ . Le terme de création correspond par exemple à la production d'espèce chimique dans un réacteur ou à l'augmentation d'entropie dans un bilan entropique. Il peut être négatif pour traduire une consommation d'espèce chimique dans un réacteur. Le terme d'accumulation n'intervient que dans les systèmes non stationnaires, il traduit les fluctuations de la quantité de produit en réponse à un changement de concentration ou de retentions. Les deux autres termes représentent la contribution des flux convectifs et des phénomènes de transport. [1]

Nous étudierons dans ce chapitre les différentes étapes conduisant à la détermination d'un modèle mathématique, représente la dynamique de la colonne d'absorption de CO<sub>2</sub> d'un mélange gazeuse (CO<sub>2</sub>+air) par une solution aqueuse de (MEA+eau).

### 1. Caractéristiques et principe de fonctionnement de la colonne :

La colonne à garnissage est de diamètre 7.5 cm et de hauteur 1.26 m en verre, garni sur toute sa hauteur par les Annaux *Rashing* de dimension caractéristique de 10.5 mm. Le rôle de la colonne est d'obtenir des transferts simultanés de matière et de chaleur entre les deux phases en pression atmosphérique et en température T=25°C. [2]

Le solvant est chargé dans le soubassement de la colonne et il revient en permanence en tête de colonne grâce à une pompe à travers l'échangeur qui permet d'éliminer la chaleur apportée par l'absorption. Les phases gaz et liquide circulent à contre-courant à travers le garnissage en raison d'établir un contact parfait entre les deux phases. Le gaz à traiter est introduit en fond de la colonne et sort en tête. Le solvant se charge progressivement en composant absorbable ( $\text{CO}_2$ ).



Figure I-1 : schéma de la colonne d'absorption

## 2. Etude de la réaction chimique :

Dans les nombreuses applications industrielles, l'absorption est accompagnée d'une réaction chimique, cette dernière peut être instantanée ou lente, cela implique que le déroulement d'une absorption avec réaction est beaucoup influencé par la constante de la vitesse de réaction  $K$ .

- Pour un régime de réaction très lent, l'absorption se rapproche des conditions d'une absorption sans réaction chimique.
- Pour des valeurs de  $K$  intermédiaires, le processus est déterminé par la vitesse de réaction.
- Dans le cas des régimes de réaction très rapide, le processus est déterminé par la diffusion de la substance  $P$ .

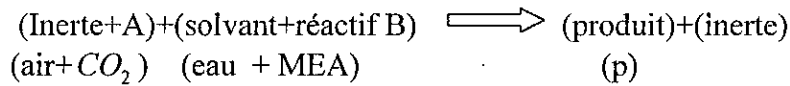
Parmi ces opérations d'absorptions par réaction chimique, on cite:  
 Le lavage des gaz acides:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ .  
 La fabrication de produits purs:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ , nitrate, etc.  
 La biotechnologie: fermentation, oxydation des boues, etc.

Dans notre réaction, nous nous intéresserons à étudier la réaction chimique entre le DiOxyde du Carbone  $\text{CO}_2$  et la Monoéthanolamine MEA.

D'après la Figure I-2, et en tenant compte l'hypothèse suivante:

-La réaction entre le composé  $\text{CO}_2$  et la MEA est rapide et du pseudo-premier ordre.

La réaction d'absorption de  $\text{CO}_2$  avec la solution d'amine s'écrit:



La vitesse de réaction  $r$  est définie comme suit:

$$r_A = kC_{AL}(x)C_{BL}(x) = k'C_{AL}(x) \quad (1.1)$$

En prenant en compte :  $C_{BL}(x)=C_{Be}=\text{constante}$  :

$$\text{La relation (1.1) devient } r=kC_{AL}(x) \quad (1.2)$$

Avec :  $k' = kC_{Be}$

Constante de vitesse de réaction.  $k$  :

Constante de la réaction de pseudo-premier ordre.  $k'$  :

Concentration du composé dans la phase liquide.  $C_{AL}(x)$  :

Concentration du composé B dans la phase liquide.  $C_{BL}(x)$  :

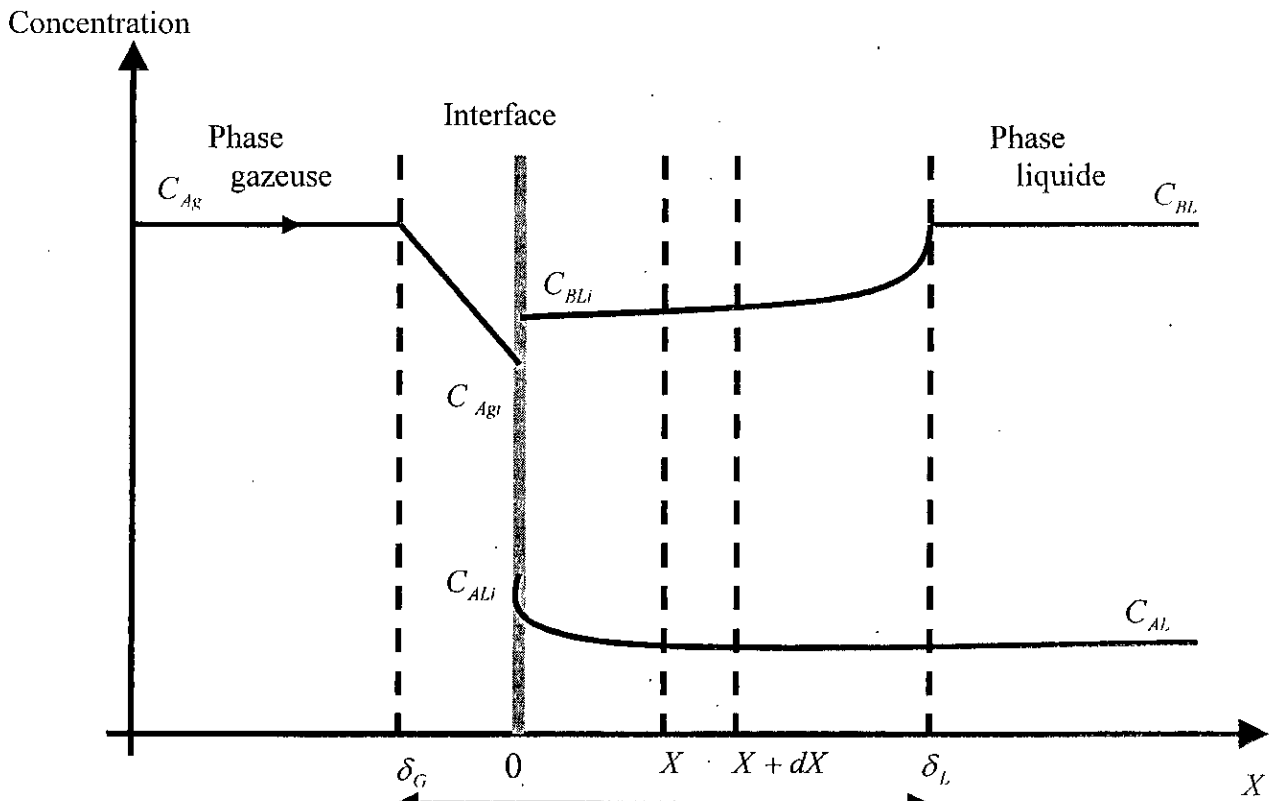


Figure I-2 : schéma du modèle du film appliqué à la colonne d'absorption



### 3. Le bilan de matière en phase liquide :

#### 3.1 Calcul de flux d'absorption :

Le bilan de matière en phase liquide pour le composé A pour une tranche de filme liquide d'épaisseur  $dx$ , en tenant compte du transfert de matière avec réaction chimique, s'écrit en appliquant la loi de *Fick* à la diffusion moléculaire dans les milieux quasi-immobiles : [2]

$$\begin{array}{l} \text{Flux de A entrant} \\ \text{à l'abscisse } x \end{array} \pm \begin{array}{l} \text{Quantité de A apparaissant} \\ \text{(ou disparaissant) par unité de temps} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Flux de A sortant} \\ \text{à l'abscisse } x + dx \end{array}$$

Ce qui peut être représenté par :

$$-D_{AL} \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x + \nu_A r_A dx = -D_{AL} \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} \quad (1.3)$$

$\nu_A$  : coefficient stœchiométrie du composé A pour  $dx$  très petit, on peut écrire :

$$\frac{[dC_{AL}(x)]_{x+dx} - [dC_{AL}(x)]_x}{dx} = \frac{d[dC_{AL}(x)]}{dx} = \frac{d^2C_{AL}(x)}{dx^2} \quad (1.4)$$

On peut alors réécrire l'équation (1.3) de la manière suivante :

$$D_{AL} \left\{ \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} - \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x \right\} + \nu_A r_A dx = 0 \quad (1.5)$$

Si on divise l'équation (1.5) par  $dx$ , et en utilisant l'égalité (1.4), on aboutira à l'équation différentielle suivante :

$$D_{AL} \left[ \frac{d^2C_{AL}(x)}{dx^2} \right] + \nu_A r_A = 0 \quad (1.6)$$

avec les conditions aux limites :

$$\begin{array}{l} x = 0; C_A(0) = C_{ALi} \\ x = \delta_L; C_A(\delta_L) = C_{AL} \end{array}$$

L'intégration de l'équation (1.5) est plus ou moins complexe suivant la forme de l'équation de vitesse. D'après l'équation (1.1), et considérant que  $\nu = -1$ , l'équation (1.6) devient :

$$D_{AL} \left[ \frac{d^2C_{AL}(x)}{dx^2} \right] - kC_{AL}(x)C_{BL}(x) = 0 \quad (1.7)$$

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

$$C_{BL}(x) = C_{Be} = \text{constante.} \quad (1.8)$$

L'équation (1.7) devient :

$$D_{AL} \left[ \frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] - k C_{AL}(x) C_{BL} = 0 \quad (1.9)$$

avec les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} x = 0; C_{AL}(0) &= C_{ALi} \\ x = \delta_L; C_{AL}(\delta_L) &= C_{AL} \end{aligned}$$

La solution générale de l'équation (1.9) s'écrit :

$$C_{AL}(x) = \beta_1 \exp(\alpha x) + \beta_2 \exp(-\alpha x) \quad (1.10)$$

avec :

$$\alpha = \left[ \frac{k C_{BL}}{D_{AL}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

En résolvant l'équation (1.9), en utilisant les conditions aux limites, on trouve que la concentration du composé A en phase liquide s'écrit :

$$C_{AL}(x) = \frac{C_{AL} \operatorname{sh}(\alpha x) + C_{AL} \operatorname{sh}[\alpha(\delta_L - x)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (1.12)$$

Et le gradient de  $C_A(x)$  s'exprime alors par :

$$\frac{dC_{AL}(x)}{dx} = \frac{\alpha C_{AL} \operatorname{ch}(\alpha x) - \alpha C_{AL} \operatorname{ch}[\alpha(\delta_L - x)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (1.13)$$

On en déduit le flux traversant l'interface :

$$[F_a]_{x=0} = -D_{AL} \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=0} = \frac{-D_{AL} \alpha \delta_L \operatorname{ch}(\alpha \delta_L)}{\delta_L \operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \left[ C_{AL} - \frac{C_{AL}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} \right] \quad (1.14)$$

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

$$[F_a]_{x=\delta_L} = -D_{AL} \left[ \frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=\delta_L} = k_A \frac{\alpha \delta_L}{\operatorname{th}(\alpha \delta_L)} \left[ \frac{C_{AL}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} - C_{AL} \right] \quad (1.15)$$

Le terme  $(\alpha\delta_L)$  représente un nombre dimensionnel, appelé nombre de HATTA (ha), qui est défini par la formule suivante : [29]

$$\alpha\delta_L = Ha = \frac{\sqrt{kC_{BL}D_{AL}}}{k_A} \quad (1.16)$$

avec :

$D_{AL}$  : Coefficient de diffusion du composé A dans la phase liquide.

$\delta_L$  : Epaisseur du film côté liquide.

$k_A$  : Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide, dans le cas où il n'y a pas de réaction chimique. Donc on peut exprimer la vitesse d'absorption D A, par unité de temps et par unité d'aire interfaciale, en présence de réaction chimique en fonction de HATTA :

$$[F_A]_{x=0} = k_A \frac{Ha}{th(Ha)} \left[ C_{AL} - \frac{C_{AL}}{ch(Ha)} \right] \quad (1.17)$$

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

$$[F_A]_{x=0}^* = k_A (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (1.18)$$

Considérant la grandeur  $W$  comme étant le rapport des flux avec réaction chimique, c'est à dire :

$$W = \frac{[F_A]_{x=0}}{[F_A]_{x=0}^*} = \frac{Ha}{th(Ha)} \frac{1 - \frac{\zeta}{ch(Ha)}}{1 - \zeta} \quad \text{avec : } \zeta = \frac{C_{AL}}{C_{ALi}} \quad (1.19)$$

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

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

$$J = \frac{[F_A]_{x=\delta_L}}{[F_A]_{x=0}} = \frac{1 - \zeta ch(Ha)}{ch(Ha) - \zeta} \quad (1.20)$$

suivant les valeurs du nombre de HATTE, en utilisant les rapport  $W$  et  $J$ , trois cas existent [28] :

1.  $Ha < 0.3 \Rightarrow$  Réaction lente :  $ch(Ha)$  et  $J$  tendent vers 1, la réaction se déroule essentiellement au cœur de la phase liquide, Dans ce cas :

$$[F_A]_{x=0}^* = [F_A]_{x=0} = k_A (C_{ALi} - C_{AL}) \rightarrow W \approx 1. \quad (1.21)$$

2.  $0.3 < Ha < 0.5 \Rightarrow$  cas intermédiaire : on utilise l'expression (1.11).

3.  $Ha > 5 \Rightarrow$  réactions rapide : La valeur de  $\zeta$  sera faible, la réaction se déroule essentiellement dans le film. Dans ce cas :

$$J = \frac{1}{ch(Ha)} \text{ et } W \approx Ha \quad (1.22)$$

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

$$[F_A]_{x=0} C_{AII} k_A Ha = C_{AL} \sqrt{k C_{BI} D_{AL}} = C_{AI} \sqrt{k' D_{AL}} = \frac{\phi}{a} \quad (1.23)$$

Finalement on trouve que :

$$\phi = C_{AI} a \sqrt{k' D_{AL}} \quad (1.24)$$

Avec :

$\phi$  : flux d'absorption.

$a$  : aire interfaciale.

#### 4. La représentation mathématique de la colonne :

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

- il n'y a pas de résistance en phase gaz,
- l'écoulement est en régime permanent,
- 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.

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

Puisqu'on s'intéresse à l'évolution de la concentration du  $CO_2$  sur le long de la colonne d'absorption , on effectue le bilan de matière en soluté  $CO_2$  sur la phase gazeuse et sur un élément dz (Figure I-3). [2]

$$\text{Soluté à l'entrée (z)} = \text{soluté à la sortie (z+dz)} + \text{soluté transféré} \quad (1.25)$$

$$\begin{aligned} \text{Entrée à la cote (z)} &= (GC_{Ag})_z + (-D_g S \varepsilon_g dC_{Ag}/dz)_z \\ &\quad \text{Flux convectif en (z)} \quad \quad \quad \text{flux dus a la dispersion axiale en (z)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sortie à la cote (z+dz)} &= (GC_{Ag})_{z+dz} + (-D_g S \varepsilon_g dC_{Ag}/dz)_{z+dz} \\ &\quad \text{Flux convectif en (z+dz)} \quad \quad \quad \text{flux dû à la dispersion axiale en (z+dz)} \end{aligned}$$

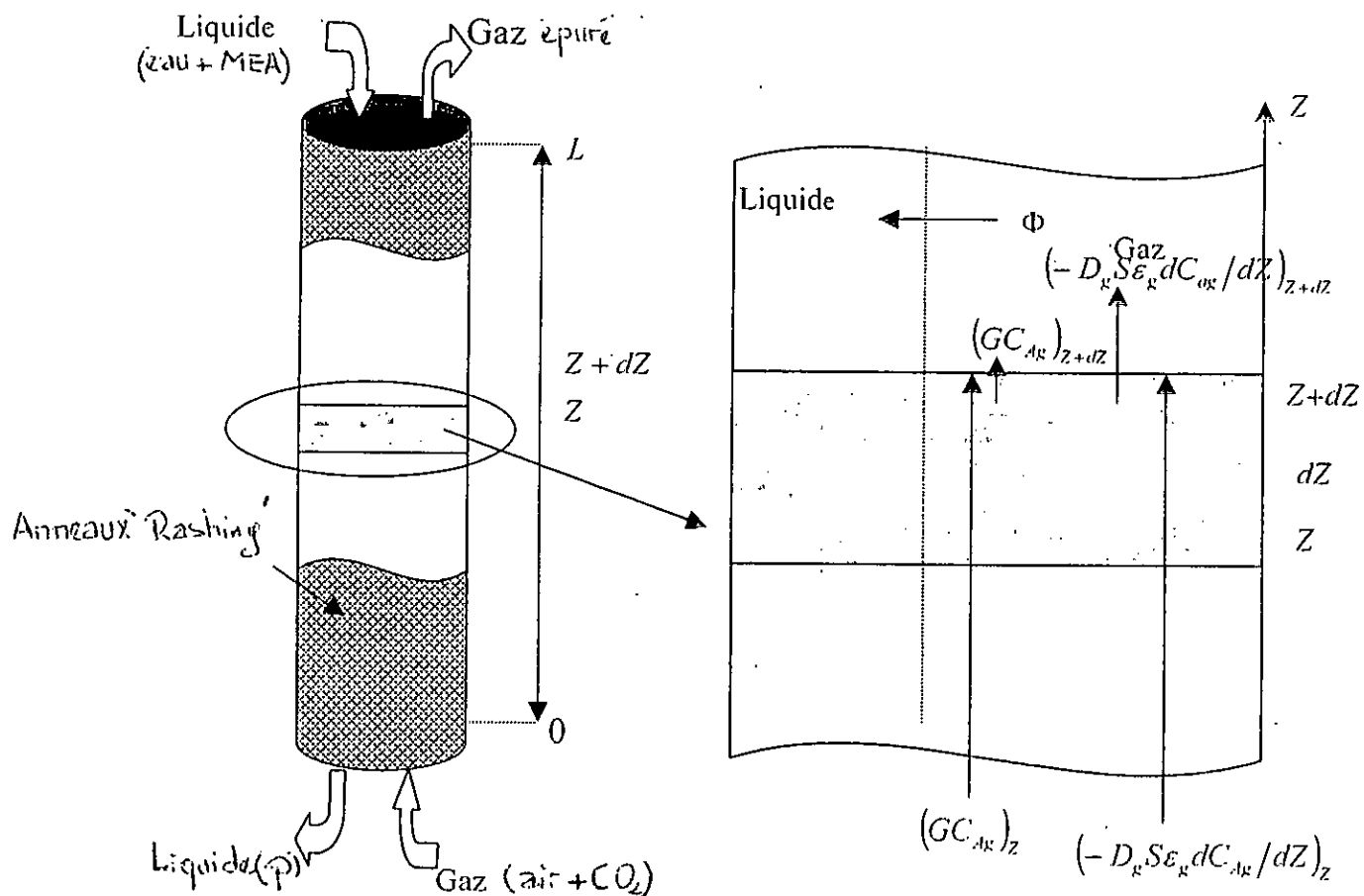


Figure I-3 : Bilan de matière sur une tranche élémentaire dz

La quantité de soluté transférée de la phase gazeuse vers la phase liquide est :  $\phi \cdot S \cdot dz$ .

Accumulation dans l'élément  $dz$  :  $S \cdot dz \cdot \frac{dC_{AK}}{dt}$ . Soit le bilan de matière sur une tranche  $dz$  dans la phase gazeuse :

$$(GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz})_z = (GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz})_{z+dz} + \phi S dz + S dz \frac{dC_{AK}}{dt} \quad (1.26)$$

or :

$$(GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz})_{z+dz} = (GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz})_z + \frac{d}{dz} (GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz}) \cdot dz \quad (1.27)$$

Donc l'équation devient finalement :

$$\frac{d}{dz} (GC_{AK} - D_k S \epsilon_k \frac{dC_{AK}}{dz}) \cdot dz + \phi S dz \frac{dC_{AK}}{dt} = 0 \quad (1.28)$$

Où :

$$D_g \varepsilon_g \frac{\delta^2 C_{Ag}}{\delta z^2} - \frac{G}{S} \frac{\delta C_{Ag}}{\delta z} - \phi = \frac{\delta C_{Ag}}{\delta t} \quad (1.29)$$

Soit :  $U_g = \frac{G}{S}$  la vitesse moyenne d'écoulement, alors l'équation (1.29) s'écrit :

$$-D_g \varepsilon_g \frac{d^2 C_{Ag}}{dz^2} + U_g \frac{dC_{Ag}}{dz} + \phi = 0 \quad (1.30)$$

En admettant que l'équilibre est établi à l'interface gaz-liquide et pour de faibles concentrations de  $CO_2$  (A), on peut exprimer cet équilibre par une droite de la forme :

$$C_{Agi} = m C_{Ali} \quad (1.31)$$

puisque par hypothèse, il n'y a pas de résistance en phase gaz, on peut écrire donc :

$$C_{Agi} = C_{Ag} \quad (1.32)$$

L'expression de flux de transfert de matière  $\phi$  devient donc :

$$\phi = \frac{a}{m} \sqrt{k C_{Be} D_{Al}} C_{Ag} \quad (1.33)$$

L'équation (1.30) s'écrit :

$$D_g \varepsilon_g \frac{\delta^2 C_{Ag}}{\delta z^2} - U_g \frac{\delta C_{Ag}}{\delta z} - \frac{a \sqrt{k C_{Be} D_{Al}}}{m} C_{Ag} = \frac{\delta C_{Ag}}{\delta t} \quad (1.34)$$

et nous avons :

$$\varepsilon = \varepsilon_L + \varepsilon_g$$

avec :

$\varepsilon_L$  : est exprimé d'après la formule de Farid et Gunn.

$a$  : aire interfaciale, elle est calculée d'après la formule de Onda et Col.

Les paramètres utilisés dans la modélisation de la colonne d'absorption sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau I-1 : Les paramètres du modèle**

$D_g = 1.10^{-3} m^2 s^{-1}$ $\varepsilon = 0.67$ $\varepsilon_L = 8.85.10^{-2} (U_L)^{0.43} .(a)^{0.85}$ $S = 0.0044 m^2$ $m = 1.2$ $k = 5.868 m^3 .mol^{-1} s^{-1}$ $D_{AL} = 1.51.10^{-9} m^2 .s^{-1}$ $a = 469.11 \left\{ 1 - \exp(-3.3.U_L^{0.4}) \right\}$
--

### 5. Conditions aux limites

La résolution de l'équation (1.34) exige des conditions aux limites bien définies pour initialiser l'algorithme de calcul, ces conditions sont données par [2]:

- En bas de la colonne :

$$\text{pour } z=0 : \quad \left( C_{Ag} + \frac{D_g \varepsilon_g}{U_g} \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right)_{z=0} = C_{Ae}$$

- En haut de la colonne :

$$\text{pour } z=L : \quad \left( \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right)_{z=L} = 0$$

Donc, le système d'équations qui caractérise la dynamique de la colonne est donné par :

$$\left( \begin{array}{l} D_g \varepsilon_g \frac{\partial^2 C_{Ag}}{\partial z^2} - U_g \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} - \frac{a \sqrt{k C_{Be} D_{AL}}}{m} C_{Ag} = \frac{\partial C_{Ag}}{\partial t} \\ \left( C_{Ag} + \frac{D_g \varepsilon_g}{U_g} \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right)_{z=0} = C_{Ae} \\ \left( \frac{\partial C_{Ag}}{\partial z} \right)_{z=L} = 0 \end{array} \right.$$

La désignation des variables et des constantes utilisés dans ce chapitre se trouve dans l'annexe.

### 6. Conclusion :

Au cours de ce premier chapitre, nous avons analysé le mode de fonctionnement de la colonne, puis établi étape par étape son modèle mathématique à l'aide des principes

fondamentaux concernant le transfert de matière,... Le modèle qui a été trouvé est non linéaire et une équation aux dérivées partielles du deuxième ordre.

Après l'étape de modélisation, il nous reste des étapes aussi plus importantes, il s'agit de la simulation et de l'identification, pour appliquer une loi de commande qui pourra satisfaire à nos aspects, économie, précision et stabilité, ces étapes seront notre objectif dans les chapitres qui suivent.



# Chapitre II

## Simulation de la colonne d'absorption

---

Avec le développement de la technologie informatique, la simulation numérique est de plus en plus utilisée dans plusieurs domaines. Les techniques de simulation non seulement jouent un rôle important dans les études scientifiques, mais aussi occupent des places importantes dans le secteur militaire, de l'éducation et dans beaucoup d'autres. Certains définissent la simulation comme étant : *La technique de limitation du comportement d'un processus par le moyen d'une situation analogue ou dispositif dans le but d'étude ou d'apprentissage personnel.* D'autres la définissent comme : *La représentation d'un système physique par un périphérique tel que un ordinateur ou un modèle qui limite le comportement du système.*

Ce chapitre est commencé par une étude générale des EDP ensuite un bref explicatif des outils Matlab *PdePe* et *S-function*, suivi de la simulation du comportement de la colonne pour plusieurs situations et enfin clôturé par une conclusion.

### 1. Les équations aux dérivées partielles (EDP)

#### 1.1. Généralités :

Les équations aux dérivées partielles sont utilisées dans les modèles mathématiques des phénomènes physiques qui sont distribués dans le temps et/ou l'espace. Comme par exemple, le transfert de la chaleur, la dynamique des fluides, la propagation des ondes, etc. Ce type de modèles mathématiques relie certaines variables, des variables dépendantes et leurs dérivées, à d'autre variable, indépendantes. Dans certains cas une variable qui est distribuée dans l'espace et/ou le temps, i.e. un champs de température, peut être approché par une variable scalaire. Par exemple, quand la température d'un fluide dans un récipient est étudiée, la température est supposée la même partout dans le récipient dans n'importe quel instant, et on peut étudier le changement de la température comme une fonction du

temps basée sur le débit du fluide. Ainsi le modèle simplifié dépend seulement d'une variable, le temps, les dérivées qui occurrent sont des dérivées du temps, et les équations du modèle sont des équations différentielles ordinaires (ODEs).

Dans des modèles plus compliqués quand la distribution de la température est étudiée avec une température différente à des différentes positions dans le récipient, la température est une fonction des variables indépendantes représentant les coordonnées de l'espace dans le récipient; et aussi de la variable temps, si le comportement dépendant du temps est étudié. Les dérivées qui occurrent dans ces types de modèles sont des dérivées partielles par rapport à une des variables, les coordonnées de l'espace ou le temps.

*Les équations différentielles qui font appel à des dérivées partielles sont donc appelées les équations au dérivées partielles (Partial Differential Equations PDEs). Si une dépendance en temps est présente les modèles sont appelés dépendant du temps, sinon stationnaire.* [15]

L'ordre d'une équation différentiel est défini comme étant le plus grand ordre de différentiation présent dans cette équation. En général, l'ordre des modèles le plus utilisés et celui du deuxième ordre. On utilise une des trois notations suivantes :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \partial_x u = u_x \quad (2.1)$$

Une dérivée du deuxième ordre peut être écrite comme suit :

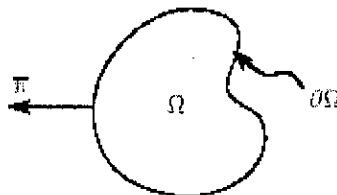
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \partial_{xx} u = u_{xx} \quad (2.2)$$

La deuxième différentiation peut être faite par rapport à une différente variable que la première différentiation, i.e.  $\partial_{xy} u = u_{xy}$ .

En général, une PDE du deuxième ordre avec la variable inconnue et dépendante  $u$  et les variables indépendantes  $x$  et  $y$  peut être énoncé par :

$$f(u, u_x, u_{xx}, u_y, u_{yy}, u_{xy}, u_{yx}, x, y) = 0 \quad x \in \Omega \quad (2.3)$$

Le domaine de définition i.e. la région géométrique dans laquelle la PDE est définie, notée  $\Omega$ , est dans la plus part des cas une région fermée dans l'espace définie par les variables indépendantes (Figure II-1).



**Figure II-1** : Exemple de domaine de définition de l'EDP

Les conditions aux limites dans un problème d'EDP spécifie le comportement du modèle dans les limites du domaine, noté  $\partial\Omega$ , et souvent contient des dérivées du premier ordre. Une condition aux limites correspondant à l'équation (2.1) peut être exprimée, en général, par :

$$g(u, u_x, x) = 0 \quad x \in \partial\Omega \quad (2.4)$$

Les trois types de conditions aux limites qui se présentent souvent ont des noms spécifiques :

Dirichlet :  $u = g \quad \text{sur} \quad \partial\Omega \quad (2.5)$

Neumann :  $\frac{\partial}{\partial n} u = g \quad \text{sur} \quad \partial\Omega \quad (2.6)$

Robin :  $\frac{\partial}{\partial n} u + qu = g \quad \text{sur} \quad \partial\Omega \quad (2.7)$

Dans le cas où le coté droit serait zéro, la condition correspondante est appelée *homogène*, sinon *non-homogène*.

## 1.2. Méthodes de résolution des EDP : [19]

Peu est le nombre des problèmes des EDP qui peuvent être résolus analytiquement, et encore moins ceux qui sont solvables avec des conditions aux limites pratiquement intéressantes. Pour cette raison, la plupart des chercheurs se sont plantés sur la résolution numérique des EDPs, et différentes méthodes sont développées. Contrairement aux équations aux dérivées ordinaires, il n'y a pas de méthode unifiée pour la résolution, en général, des problèmes des EDPs, et un algorithme approprié doit être choisi pour chaque cas.

La méthode de résolution dépend de si l'EDP, qu'on veut résoudre, est stationnaire ou dépendante du temps. Seulement la discrétisation d'espace est requise pour les EDPs stationnaire, alors que les problèmes dépendant du temps requièrent la discrétisation dans le temps et dans l'espace.

### 1.2.1. La méthode des différences finies :

Dans le but de trouver la fonction inconnue, le domaine est discrétisé en une série de points et les valeurs de la fonction dans ces points sont calculées. En utilisant le théorème de *Taylor*, différentes approximations peuvent être dérivées. La dérivée du premier ordre de  $u$  par rapport à  $x$  en utilisant une maille de distance  $h$  entre les points peut être approchée par :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x+h) - u(x-h)}{2h} + \alpha(h^2) \quad (2.8)$$

Ici,  $\alpha(h^2)$  représente l'erreur de l'approximation. Cette équation est appelée l'approximation de la *différence centrale* (*central-difference*). Autres approximations sont possibles comme, par exemple :

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x+h)-u(x)}{h} + \mathcal{O}(h^2) \quad (2.9)$$

qui est appelé *forward-difference*, et

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x)-u(x-h)}{h} + \mathcal{O}(h^2) \quad (2.10)$$

qui est appelé *backward-difference*. Les dérivées d'ordre supérieur peuvent être approchées d'une façon similaire. Les dérivées sont ensuite remplacées par leurs approximations et répétées pour chaque point de la maille, ce qui génère un système d'équation avec les valeurs de  $u$  comme inconnus dans chaque point. Les conditions aux limites sont appliquées aux points avoisinant les limites, selon le type conditions aux limites. Avec les conditions aux limites de *Dirichlet*, les valeurs dans les limites sont connues et peuvent donc être utilisées directement. Avec les conditions de *Neumann* et *Robin*, la dérivée est approchée de la même façon que dans l'EDP. Dans la résolution des équations dépendantes du temps, les dérivées par rapport au temps peuvent être approchées par les différences finies. On note cependant, que l'utilisation de la méthode des différences finies, le pas de la discrétisation d'espace doit être choisi conformément à certaines conditions pour maintenir la stabilité.

### 1.2.2. La méthode des éléments finis :

Une technique connue de résolution des EDPs numériquement est l'approximation de la variable dépendante  $U$  avec une série de fonctions de bases connues, connues aussi par *fonctions d'essai (trial functions)*, et ensuite trouver les coefficients qui satisfassent l'équations le plus possible, par la minimisation de l'erreur introduite par l'approximation. Si les fonctions de base sont notées par  $v_k$ , l'approximation  $\hat{v}$  de  $v$  peut être énoncer comme :

$$\hat{u}(x) = \sum_{k=0}^N a_k v_k(x) \quad (2.11)$$

Puisque il y a un nombre fini de fonctions de base et un nombre fini de coefficients inconnus, il est possible de calculer numériquement les coefficients, étant donné l'EDP et des valeurs connues dans quelques points, i.e. les conditions aux limites.

La méthode de *Galerkin* est une méthode de base pour le calcul des coefficients inconnus. Pour une EDP de la forme

$$L(u(x))=0 \quad (2.12)$$

Où  $L()$  est un opérateur linéaire contenant  $x$  et ses dérivées, une erreur résiduelle  $R$  d'une approximation  $\hat{u}$  est définie par :

$$R(\hat{u}(x))=L(\hat{u}(x)) \quad (2.13)$$

L'erreur résiduelle mesure à quel point l'approximation satisfait l'EDP. Si c'est égal à zéro, i.e.  $R(\hat{u}(x))=0$  pour tout  $x$  dans le domaine, l'approximation est alors la solution exacte. Un critère pour la mesure du rapprochement d'une fonction à zéro est de voir à sont orthogonalité pour une série de fonctions choisies. L'orthogonalité de deux fonctions  $f(x)$  et  $g(x)$  est définie par :

$$\int_{\Omega} f(x)g(x)dx=0 \quad (2.14)$$

Le résidu de la solution exacte  $R(u(x))$  est orthogonal à toutes les fonctions selon cette définition. Le résidu de cette approximation est vérifié par rapport ne série de fonctions de *test* dans un espace approprié de test. Il est suffisent de vérifier les vecteurs de base de cet espace pour y assurer l'orthogonalité de toutes les fonctions.

La méthode de *Galerkin* utilise l'espace d'essai comme un espace de *test*, et les fonctions de base  $v_k$  sont utilisées comme des fonctions de test.

$$\int_{\Omega} R(\hat{u}(x))v_k(x)dx \quad k = 0 \dots N \quad (2.15)$$

La substitution  $\hat{u}$  avec sa définition en (2.4) et le calcul des intégrales donne un système d'équation qui peut être résolu pour obtenir finalement les coefficients des fonctions d'essai et l'approximation de la solution.

La sélection des fonctions d'essai et de test ramène à plusieurs méthodes de solution. L'utilisations des polynômes comme fonctions de base pour l'espace d'essai requis un support global par les polynômes, parce que chaque fonctions de la base contribue à tout le domaine. Dans le but d'augmenter l'exactitude de l'approximation le degré des polynômes doit être augmenter.

Une méthode plus flexible est de diviser le domaine en  $m$  sous-domaines et utiliser des fonctions de base avec un support local, où chaque fonction  $v_k$  est nulle en dehors d'un sous-domaine et les domaines qui l'avoisinent. Cette méthode est appelée *la méthode des éléments finis*. Usuellement des polynômes d'ordre inférieur sont utilisés parce que le support local simplifie l'approximation. Au lieu des polynômes d'ordre supérieur, des éléments plus petits peuvent être utilisés pour une meilleure approximation, spécialement pour les partis du domaine où la solution a des changement raide. La subdivision du sous-domaine peut être accomplie par différentes méthodes, la triangulation est la plus commune. Une triangulation adaptative peut être utilisée pour affinée la maille itérativement dans les parties où l'erreur est plus grande.

### 1.2.3. La méthode des volumes finis :

Comme dans la méthode des éléments finis le domaine est discrétisé avec un générateur de mailles. Ensuite, un volume de control est défini sur chaque point de la grille, et l'EDP est intégrée sur chaque volume. Cette intégrale peut être approchée par des différences finies des points de grilles adjacent.

### 1.2.4. La méthode des lignes :

La méthode des lignes est une technique de résolution qui convertit l'EDP en un système d'EDOs comprenant seulement des fonctions dépendantes du temps et de ses dérivées. La conversion est faite la discrétisation dans l'espace, en laissant un nombre d'inconnus et de leurs dérivées par rapport au temps. Pour la discrétisation de l'espace n'importe quelle méthodes décrites précédemment peut être utiliser. Par exemple, si la méthode des différences fini est utilisée, la discrétisation de l'espace conduit à un inconnu et à ses dérivées temporelles à chaque point de la grille dans le domaine.

Un des avantages de la méthode des lignes est que des méthodes avancées de résolutions des EDOs existent et qui ne le sont pas encore pour les EDPs. Il existe, par exemple, des techniques d'ajustage automatique du pas pour trouver une solution avec l'exactitude requise. Un autre avantage est que les systèmes couplés qui contiennent et les EDPs et les EDOs deviennent plus simple à résoudre parce que la discrétisation de l'espace engendre des EDOs qui vont être résolues avec les EDOs existantes déjà dans le système.

Un désavantage, est que la discrétisation dans l'espace est indépendante d'ajustement de l'erreur du pas commandé par le processus du résolution des EDOs. Ainsi, même si la résolution des EDOs se fait avec l'exactitude désirée, l'erreur introduite par la discrétisation de l'espace peut être plus large si le pas n'est pas choisi avec soin.

Aussi, la relation entre la taille du pas dans l'espace et le temps doit satisfaire certains critères pour assurer la stabilité numérique de la solution. Cependant, ceci n'est pas vérifié par un pure algorithme de résolution des EDOs.

## 2. Simulation de la colonne d'absorption :

### 2.1. Description de la fonction *pdepe* :[20]

Résout les EDPs de type *elliptique et parabolique* dans un espace uni-dimensionnel et le temps. Les EDOs résultantes de la discrétisation de l'espace sont intégrée pour obtenir des solutions approximatif dans le *tspan*. La fonction *pdepe* retourne des valeurs de solution sur une maille fournie par *xmesh* (section 2.2.4). *Pdepe* résout les EDPs de la forme :

$$c(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x})\frac{\partial u}{\partial t}=x^{-m}\frac{\partial}{\partial x}(x^m f(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}))+s(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}) \quad (2.16)$$

Dans un intervalle  $t_0 \leq t \leq t_f$  et  $a \leq x \leq b$ . L'intervalle  $[a,b]$  doit être fini.  $m$  peut être 0,1 ou 2, selon le type de symétrie.

Dans l'équation (2.16)  $f(x,t,u,\partial u/\partial x)$  est appelé un *terme flux (flux term)* et  $s(x,t,u,\partial u/\partial x)$  un *terme source (source term)*. Le couplage des dérivées partielles par rapport au temps est restreinte à la multiplication par une matrice diagonale  $c(x,t,u,\partial u/\partial x)$ . Les éléments diagonaux de cette matrice sont soit identiquement nulles ou positifs.

Pour  $t=t_0$  et tous les  $x$ , les composants de la solutions satisfassent la condition initiale de la forme :

$$u(x,t_0)=u_0(x) \quad (2.17)$$

pour tout  $t$  et ou bien  $x=a$  ou  $x=b$ , les composants de la solution satisfassent la condition aux limites de la forme :

$$p(x,t,u)+q(x,t)f(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x})=0 \quad (2.18)$$

Les éléments de  $q$  sont ou bien identiquement nulles ou non nulles. On note que les conditions aux limites sont exprimées en terme de flux  $f$  plutôt qu'au  $\partial u/\partial x$ . Aussi, des deux coefficients  $p$  et  $q$ , seul  $p$  peut dépendre de  $u$ . Dans l'appel  $sol=pdepe(m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan)$  :

- $M$  correspond à  $m$ .
- $Xmesh(1)$  et  $xmesh(end)$  correspond à  $a$  et  $b$ .
- $Tspan(1)$  et  $tspan(end)$  correspond à  $t_0$  et  $t_f$ .
- $Pdefun$  calcule les termes  $c,f$  et  $s$ . Elle a la forme :

$$[c,f,s]=pdefun(x,t,u,dudx) \quad (2.19)$$

Les arguments d'entrée sont les scalaires  $x$  et  $t$  et les vecteurs  $u$  et  $dudx$  qui approchent la solution  $u$  et ses dérivées partielles respectivement à  $x$ .

- $Icfun$  évalue les conditions initiales. Elle a la forme :

$$U=icfun(x)$$

Quand appelé avec un argument  $x$ ,  $icfun$  évalue et retourne les valeurs initiales de la solution .

- $Bcfun$  évalue les termes  $p$  et  $q$  des conditions aux limites. Elle a la forme :

$$[pl,ql,pr,qr]=bcfun(xl,ul,xr,ur,t)$$

$u$  est la solution approchée dans la limite gauche  $xl=a$  et  $ur$  est la solution approchée dans la limite droite  $xr=b$ .  $pl$  et  $ql$  sont des vecteurs colonne correspondant à  $p$  et  $q$  évalués à  $xl$ , d'une façon similaire  $pr$  et  $qr$  correspond à  $xr$ .

$Pdepe$  retourne la solution comme un tableau multi-dimensionnel  $sol$ .  $U_i=sol(:, :, i)$  est une approximation de la  $i^{ème}$  composante du vecteur solution  $u$ . L'élément  $u_i(j,k)=sol(j,k,i)$  approche  $u_i$  à  $(t,x)=(tspan(j),xmesh(k))$ .  $U_i=sol(j, :, i)$  approche le composant  $i$  de la solution à l'instant  $tspan(j)$  et aux points de la maille  $xmesh( :)$ .

### Remarques :

- La fonction  $pdepe$  accomplit l'intégration dans le temps avec un algorithme résolvant EDO qui choisi le pas, dans le temps, et la formule dynamiquement. Les éléments de  $tspan$  spécifient, simplement, où on veut avoir une solution et le coût dépend de la longueur de  $tspan$ .

- Les approximations du second ordre à la solution sont faites sur le maillage spécifié par *xmesh*. Généralement, il vaut mieux d'utiliser des espaces très petits entre les points de la maille là où la solution change rapidement. *Pdepe* ne fait pas un choix automatique dans *x*.
- L'intégration dans le temps s'effectue à l'aide d'*ode15*.

## 2.2. Adaptation de l'équation de la colonne d'absorption à la fonction *pdepe*:

- L'équation du système est donnée par :

$$A \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + B \frac{\partial c}{\partial z} + C = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.20)$$

la réécriture de l'équation précédente donne :

$$1 * \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (A * \frac{\partial c}{\partial z}) + B * \frac{\partial c}{\partial z} + C * c \quad (2.21)$$

Par analogie avec (2.16) on déduit les terme de flux et le terme de source (sec 3.1) :

$$\begin{aligned} C_t &= 1 \\ f(z, t, c, \frac{\partial c}{\partial z}) &= A \frac{\partial c}{\partial z} \\ s(z, t, c, \frac{\partial c}{\partial z}) &= B \frac{\partial c}{\partial z} + Cc \end{aligned} \quad (2.22)$$

- Les conditions aux limites sont données par:

$$\begin{aligned} \text{À gauche} \quad c|_{z=0} &= c_e + A_b \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} \\ \text{À droite} \quad c|_{z=1.26} &= c \end{aligned} \quad (2.23)$$

On peut écrire:

$$\begin{aligned} c|_{z=0} - c_e + \frac{A_b c}{A} f(z, t, c, \frac{\partial c}{\partial z}) &= 0 \\ 0 + \frac{1}{A} f(z, t, c, \frac{\partial c}{\partial z}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

La déduction des paramètres des paramètres de la fonction *pdeic* se déduits par analogie avec l'équation (2.18).

- La condition initiale de l'équation (2.19) est sa solution en régime permanent :

$$A \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + B \frac{\partial c}{\partial z} + C = 0 \quad (2.25)$$



Qui est :

$$c(z) = \alpha e^{\lambda_1 t} + \beta e^{\lambda_2 t} \quad (2.26)$$

où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont la solution de l'équation caractéristique les deux solutions réelles ( $AC \ll B^2$ ) suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ \lambda_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{B-1 - \sqrt{1 - 4AC/B^2}}{A} \approx \frac{B-1 - (1 - 2AC/B^2)}{A} = \frac{C}{B} - \frac{B}{A} \\ \lambda_2 = \frac{B-1 + \sqrt{1 - 4AC/B^2}}{A} \approx \frac{B-1 + (1 - 2AC/B^2)}{A} = \frac{C}{B} \end{array} \right.$$

$A \ll B$  et  $B < 0$  ce qui donne  $\lambda_1 \gg 1$ . Ces valeurs de  $\lambda_1$  génère des solution, numériquement, incalculables dans (2.26).

Pour palier à ce problème d'initialisation nous avons réduit l'ordre de (2.25) :

$$B \frac{\partial c}{\partial z} + C = 0 \quad (2.27)$$

En effet cette approximation est valide puisque le terme en 2<sup>ème</sup> ordre est dû à la prise en compte du phénomène de dispersion axiale qui est très faible ce qui nous permet de le négliger. La condition initiale est donc donnée par l'expression :

$$c(z, t = 0) = c_0 e^{-\frac{C}{B}z} \quad (2.28)$$

La constante  $c_0$  se déduit de la condition au limite à gauche (2.23), la négligence du phénomène du dispersion axiale implique aussi la non-prise en compte de la condition à la limite droite (2.23), qui devient :

$$c|_{z=0} = c_e \quad (2.29)$$

Finalement la condition initiale est :

$$c(z, t = 0) = c_e e^{-\frac{C}{B}z} \quad (2.30)$$

### 2.3. Intégration du modèle de la colonne dans SIMULINK :

Pour profiter de la puissance de l'environnement MATLAB dans le passage des paramètres, la représentation des figure et l'interaction avec les *toolbox* fournis, il est nécessaire d'intégrer le modèle de la colonne dans SIMULINK. Ceci est possible grâce à la technique des blocs S-Function.

#### 2.3.1. Les blocs S-Function :[20]

les blocs *S-Function* (*System function*) fournissent un mécanisme puissant pour l'extension des capacités de Simulink. Il ont plusieurs applications, comprenant :

- L'ajout de nouveaux blocs réutilisables dans Simulink.
- L'ajout des blocs qui représentent des appareils.
- L'incorporation du code C dans une simulation.
- La description un système comme une série d'équations mathématiques.
- L'utilisation des animations.

Un avantage de l'utilisation de S-function est qu'on peut bâtir des blocs, réutilisable dans un modèle, en variant ses paramètres à chaque instance du bloc.

Pour incorporer une *S-Function* dans un modèle Simulink, On glisse un bloc *S-function*, à partir de la bibliothèque *Functions & Tables*, dans le modèle. Ensuite, on spécifie un nom de la *S-function* dans le champs *S-function name* dans la boîte de dialogue du bloc *S-function* (Figure II-2). Le bloc *S-function* fait référence à un fichier source (*mysfun*, qui peut être un *C MEX-file* ou un *M-file*). Si deux fichiers, *C MEX-file* et *M-file*, existent avec le même nom, le *C MEX-file* est favorisé et est le fichier que *S-function* utilise.

Le champs de texte *S-function parameter* du bloc *S-function* permet de spécifier les valeurs des paramètres à passer au bloc *S-function*. Pour utiliser ce champs, on doit avoir la documentation de la *S-function*. Chaque paramètre doit être entré, séparés par des virgules, dans l'ordre requis par la *S-function*. Les paramètres peuvent être des constantes, des noms de variables dans l'espace de travail ou bien des expressions MATLAB.

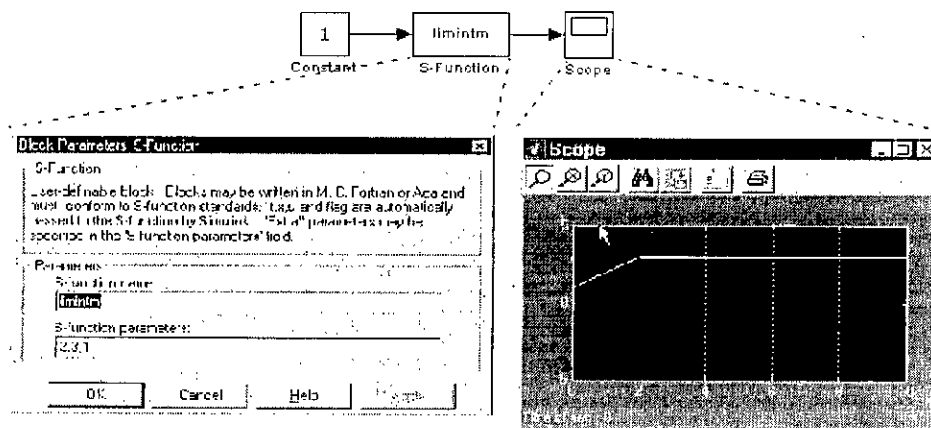


Figure II-2 : paramètres de S-Function

### 2.3.2. Application à la colonne d'absorption :

La simulation de la colonne est réalisée par le modèle colAb\_Sim.mdl. Il est composé, principalement d'un bloc *S-function*, appelé *absorbALL*, qui représente la colonne d'absorption. *absorbALL* a quatre entrées, et forcément quatre sorties, les deux premières expriment le point de fonctionnement et les deux autres expriment les variations autour de ce point. Ainsi, pour effectuer la simulation il suffit de saisir les valeurs dans les blocs correspondant et lancer la simulation, comme dans n'importe quel modèle SIMULINK.

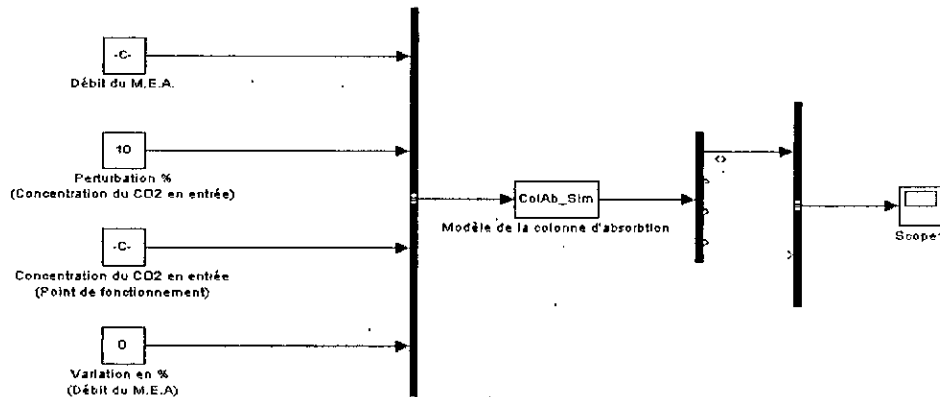


Figure II-3 : Modèle de simulation de la colonne d'absorption

### 2.4. Mode opératoire :

Compte tenu de la non-linéarité du système. La simulation est effectuée autour d'un point de fonctionnement, les variations des différentes variables sont donc limitées à une plage bien déterminée autour de ce point (Tableau III-1).

Tableau III-1 : Point de fonctionnement

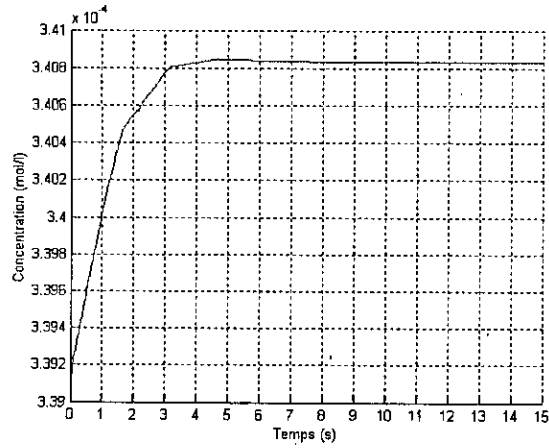
Flux gazeux	$m^3/h$ 11.222
Flux liquide	$L/h$ 30
Concentration du CO <sub>2</sub> en bas de la colonne	$mol/L$ 4.456 e-4
Concentration de MEA en tête de la colonne	$mol/L$ 9.58 e-4
Température	C° 25
Pression	1 atm
Point de fonctionnement calculé	$mol/L$ 3.3626 e-4
Point de fonctionnement expérimentale	$mol/L$ 3.31 e-4

Pour bien voir le comportement de la colonne et les interactions entre les différents signaux, nous avons effectué des variations au niveau du :

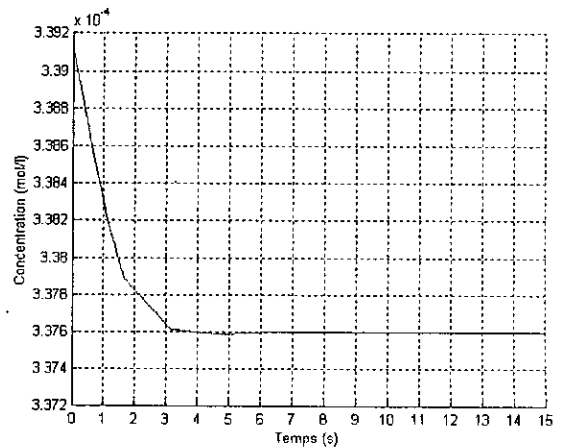
1. Débit du liquide, vu comme le signal de commande.
2. Concentration du CO<sub>2</sub> à l'entrée de la colonne, vu comme signal perturbateur.
3. Débit du MEA et de la concentration du CO<sub>2</sub> simultanément.

Les résultats obtenus sont donnés par les figures ci-après

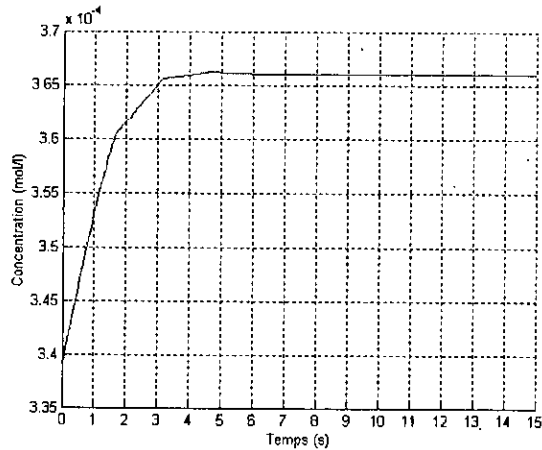
**Effet de variation de la commande (débit du MEA) :**



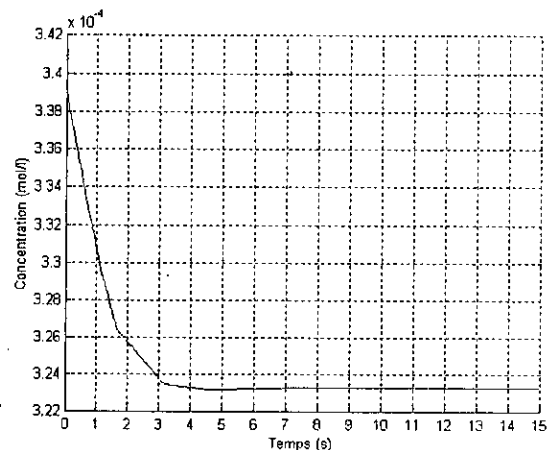
**Figure II-4a : Echelon de -5%**



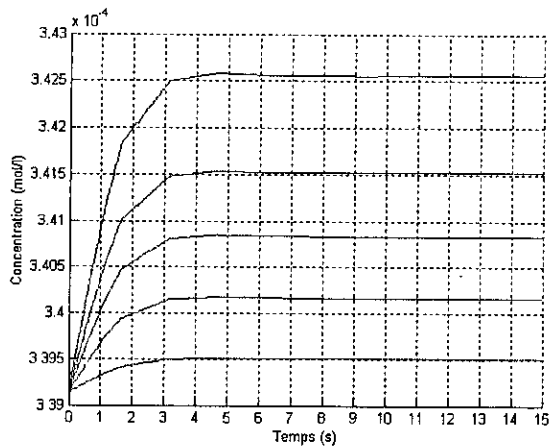
**Figure II-4b : Echelon de 5%**



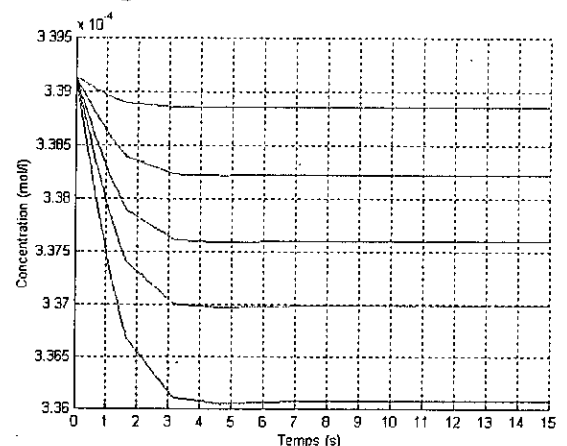
**Figure II-4c : Echelon de -50%**



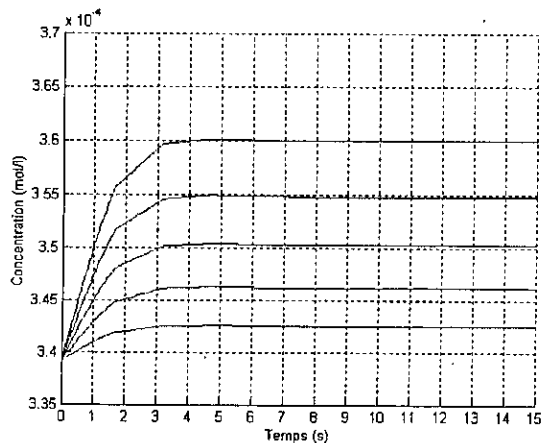
**Figure II-4d : Echelon de +50%**



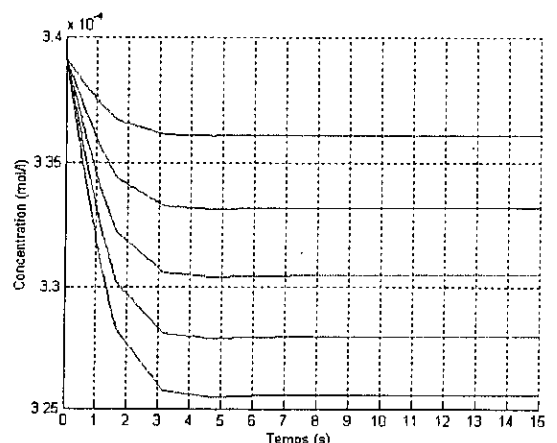
**Figure II-4e : Echelon de -5 à -10%**



**Figure II-4f : Echelon de +5 à 10%**



**Figure II-4g : Echelon de -10 à -50%**



**Figure II-4h : Echelon de +10 à 50%**

# Effet de variation de la perturbation (concentration) :

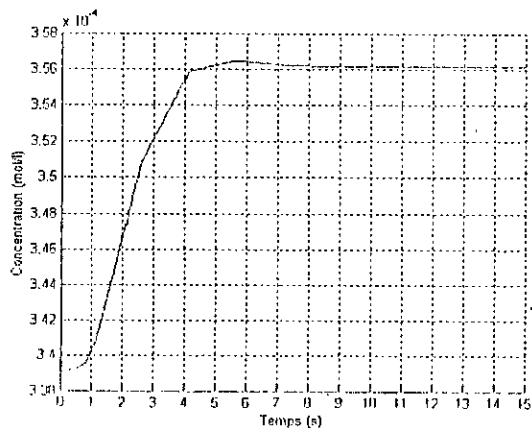


Figure II-5a : Echelon de +5%

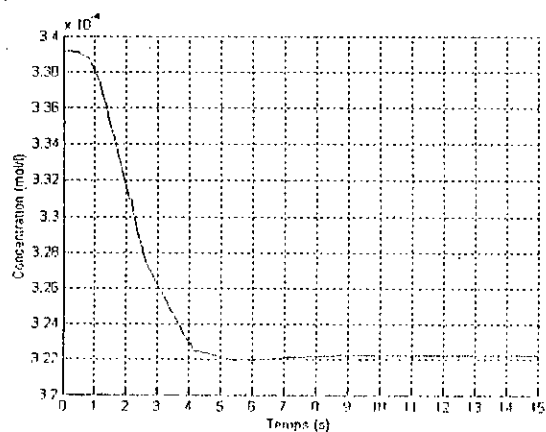


Figure II-5b : Echelon de -5%

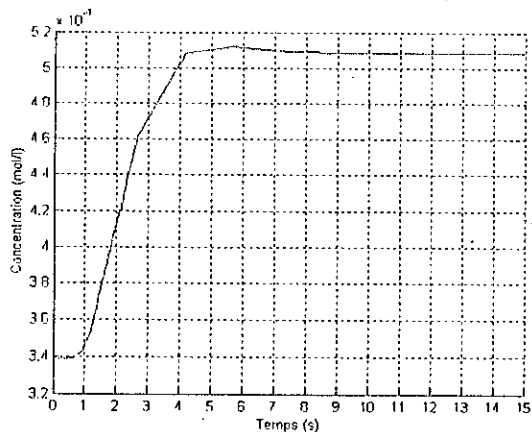


Figure II-5c : Echelon de +50%

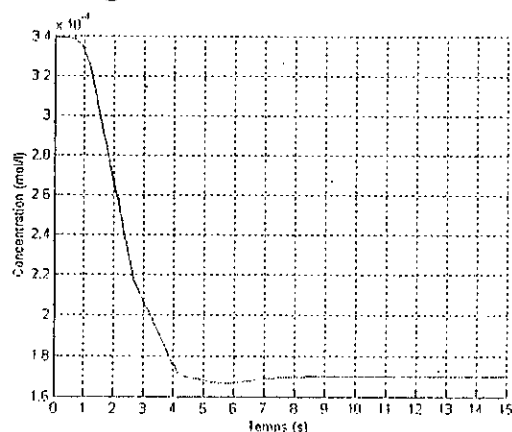


Figure II-5d : Echelon de -50%

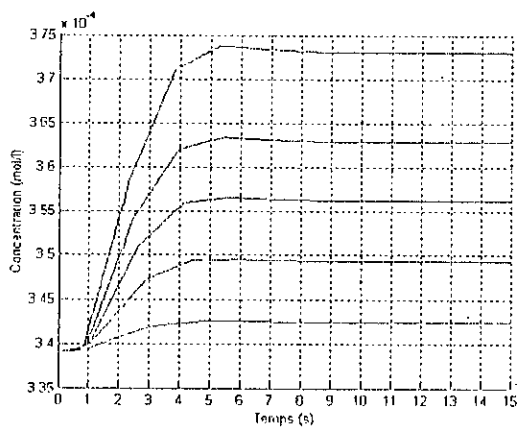


Figure II-5e : Echelon de +5 à +10%

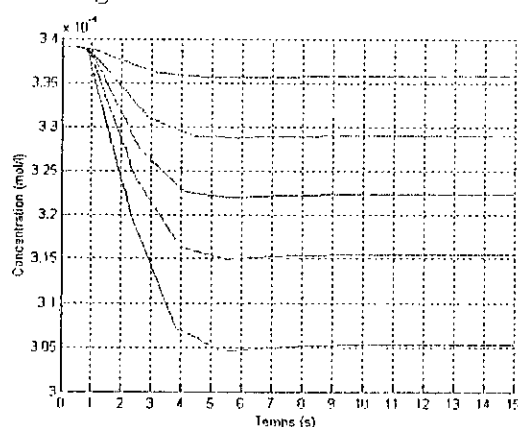


Figure II-5f : Echelon de +5 à -10%

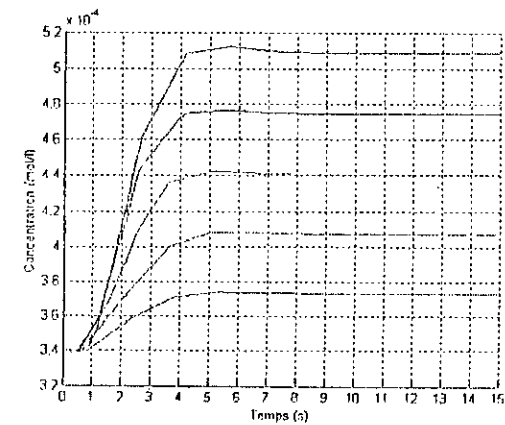


Figure II-5g : Echelon de +10 à +50%

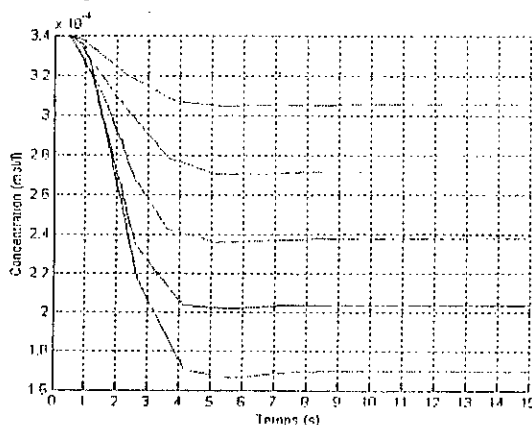


Figure II-5h : Echelon de +10 à -50%

### Interaction entre la commande et la perturbation :

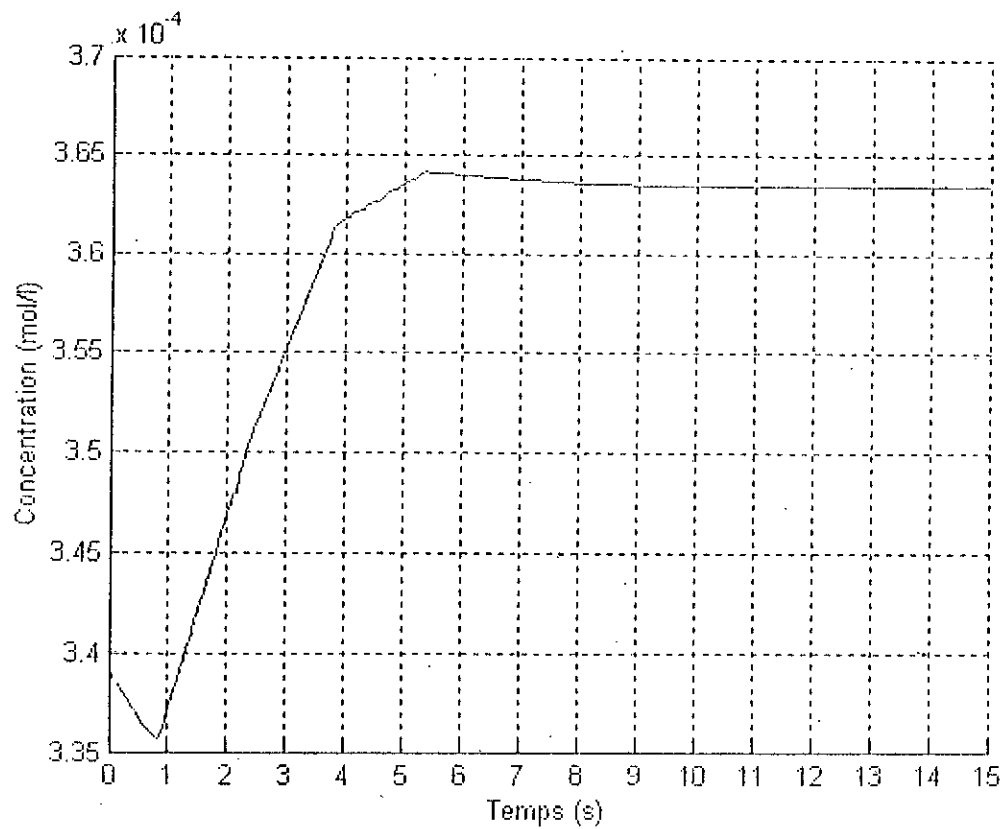


Figure II-6a : Débit 30% Concentration 10%

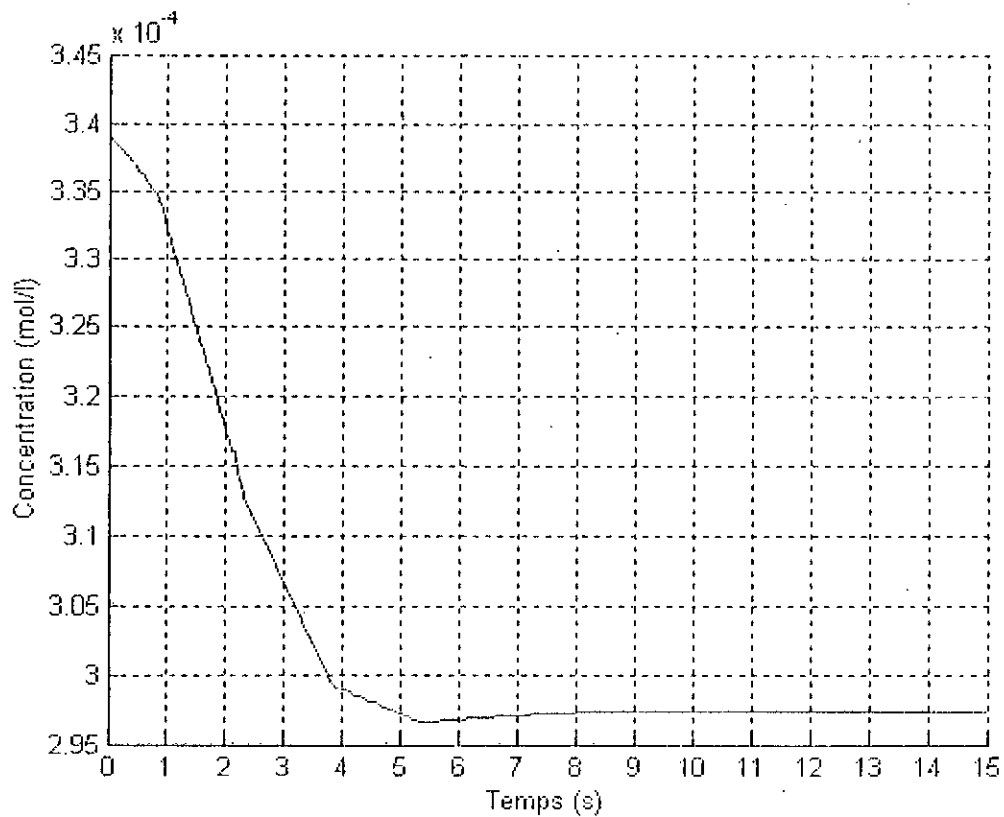


Figure II-6b : Débit 30% Concentration -10%

Interaction entre la commande et la perturbation (suite) :

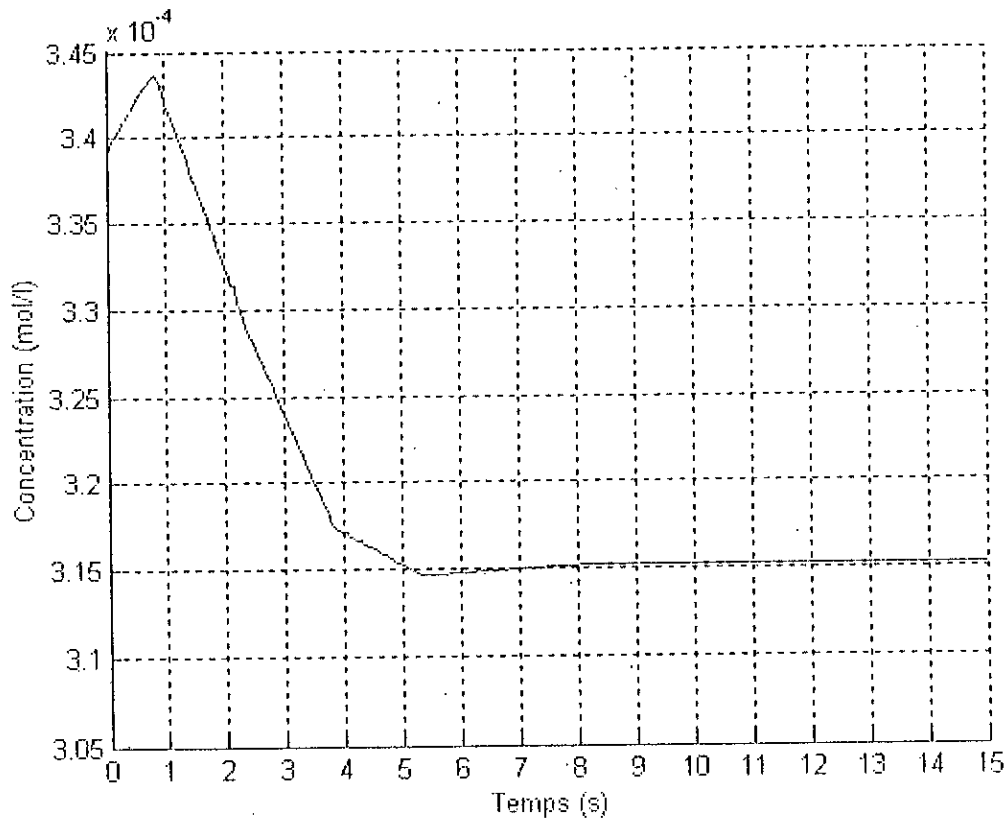


Figure II-6c : Débit -30% Concentration -10%

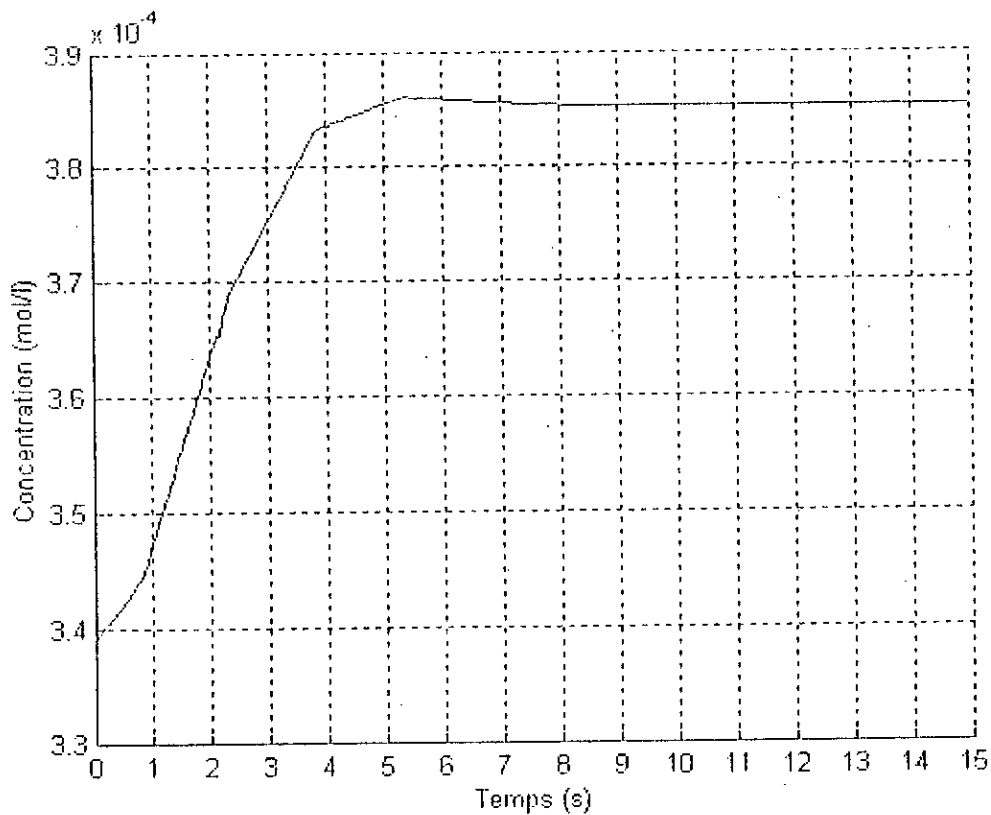
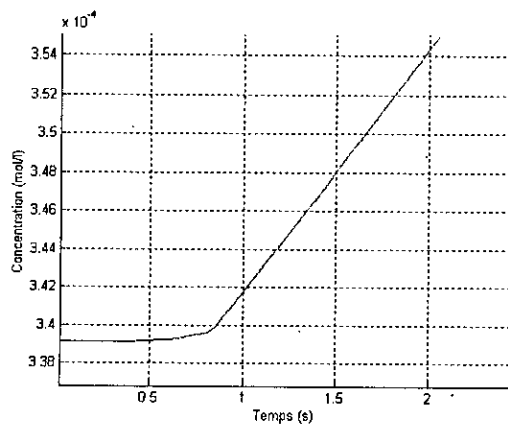
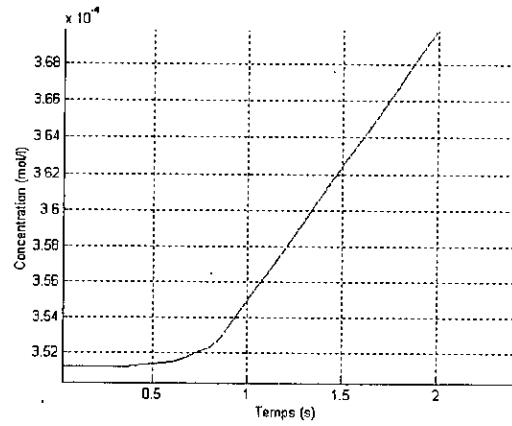


Figure II-6d : Débit+30% Concentration +10%

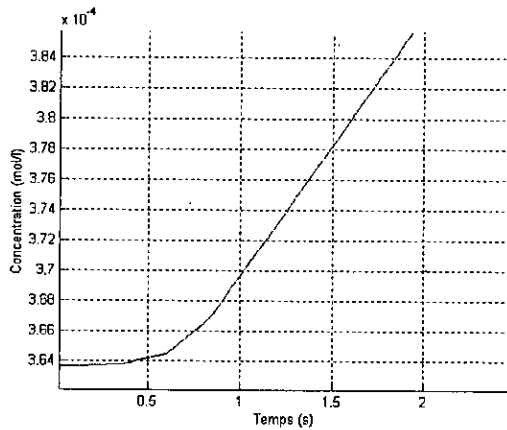
**Temps de retard (variation de Concentration par 10%) :**



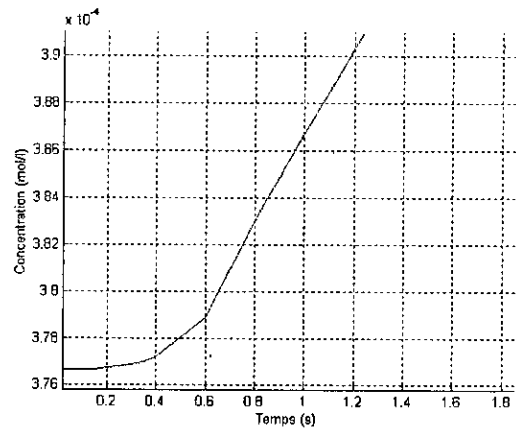
**Figure II-7a : Réponse à z=1.26m**



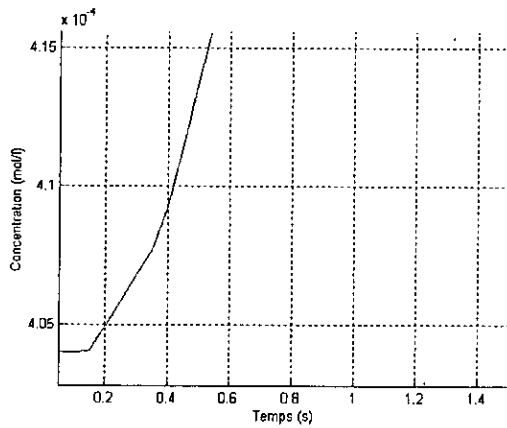
**Figure II-7b : Réponse à z=1.10m**



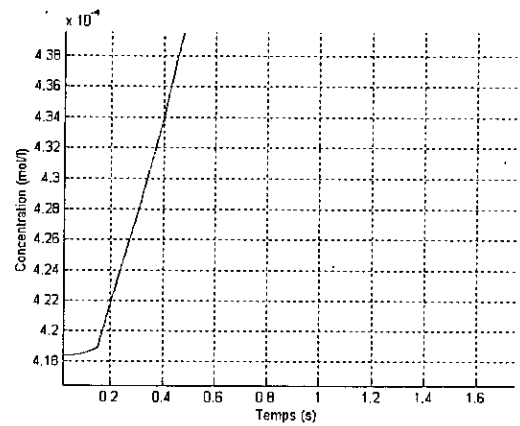
**Figure II-7c : Réponse à z=0.95m**



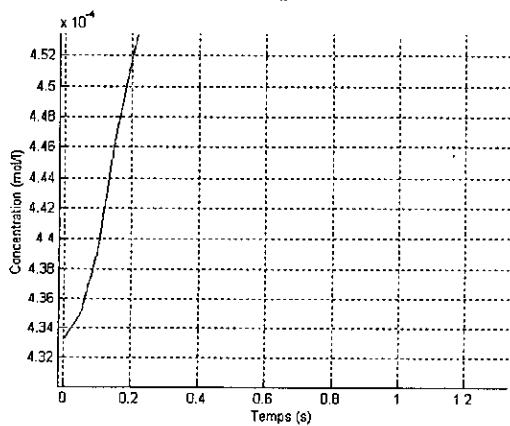
**Figure II-7d : Réponse à z=0.79m**



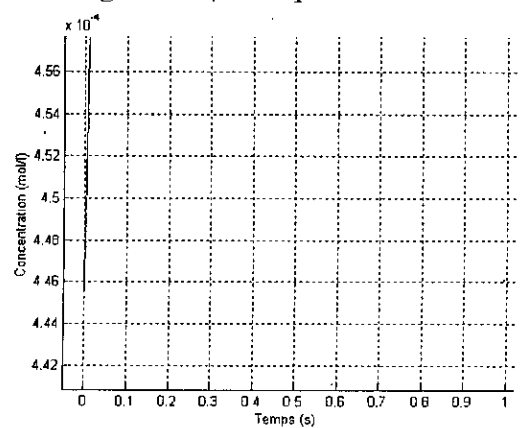
**Figure II-7e : Réponse à z=0.63m**



**Figure II-7f : Réponse à z=0.47**



**Figure II-7g : Réponse à z=0.31m**



**Figure II-7h : Réponse à z=0m**



## Temps de retard (Débit) :

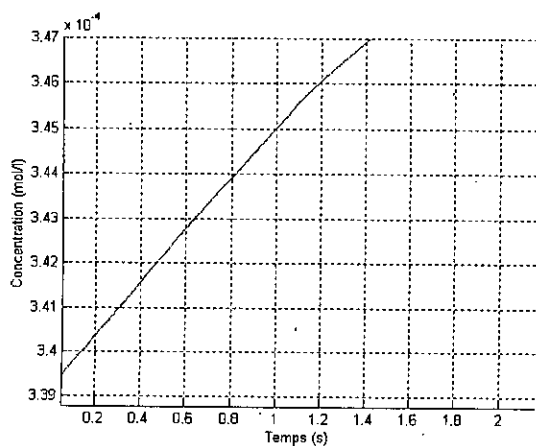


Figure II-8a : Réponse à  $z=1.26\text{m}$

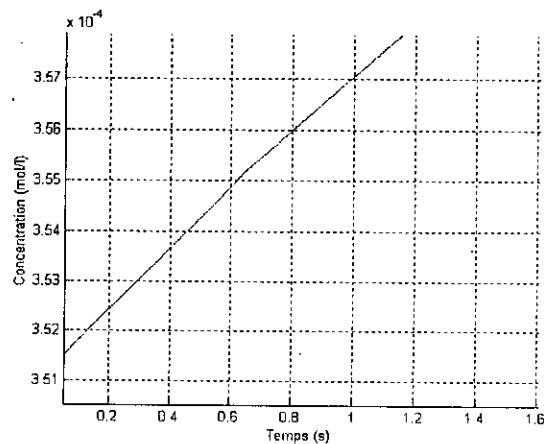


Figure II-8b : Réponse à  $z=1.10\text{m}$

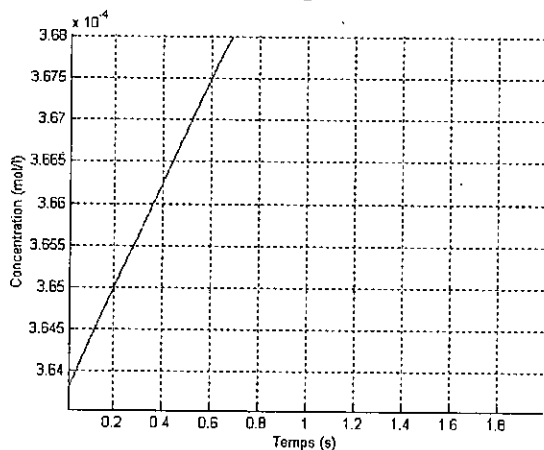


Figure II-8c : Réponse à  $z=0.95\text{m}$

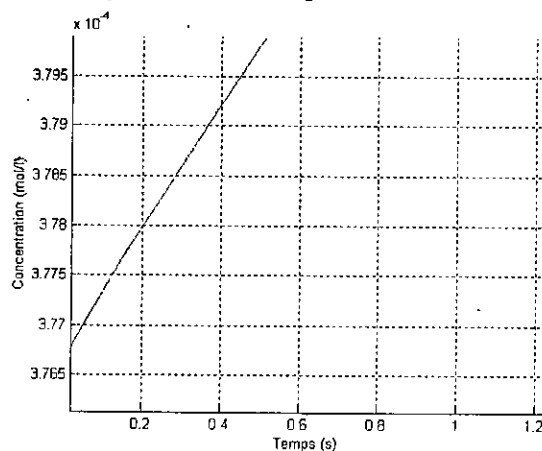


Figure II-8d : Réponse à  $z=0.79\text{m}$

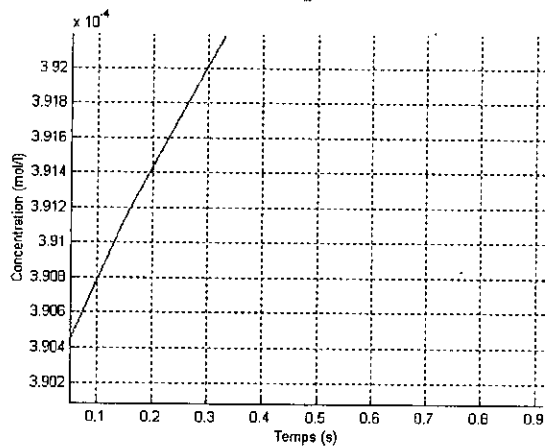


Figure II-8e : Réponse à  $z=0.63\text{m}$

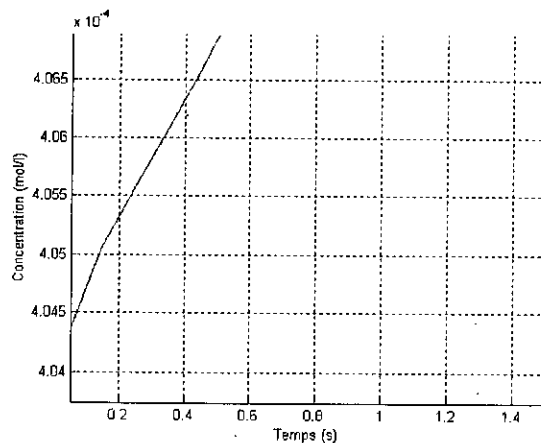


Figure II-8f : Réponse à  $z=0.47$

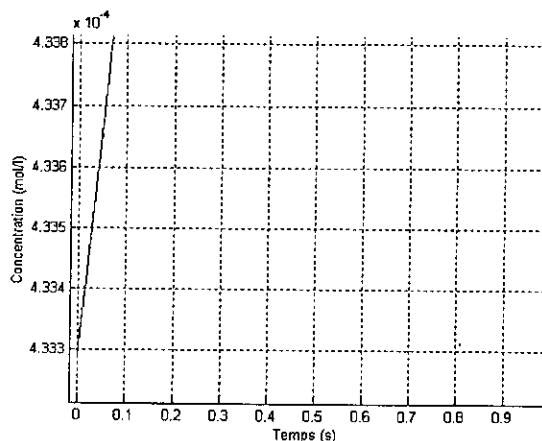


Figure II-8g : Réponse à  $z=0.31\text{m}$

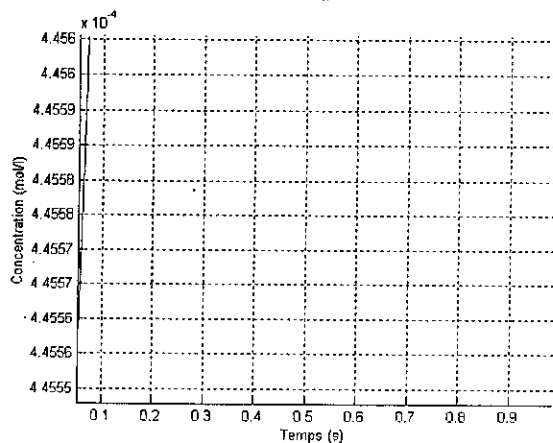


Figure II-8h : Réponse à  $z=0\text{m}$

## Profile de la concentration :

### 1. Variation de la commande (Débit du MEA) :

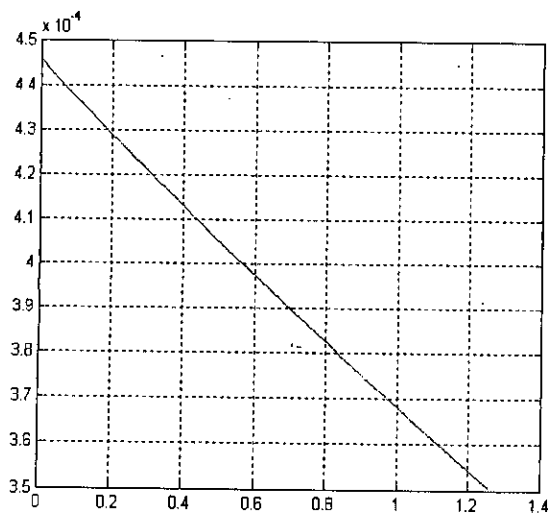


Figure II-9a : profile dans le régime transitoire  
 $t=1s$

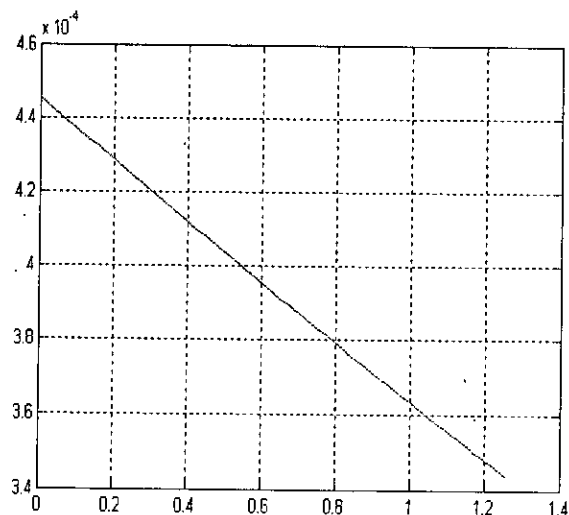


Figure II-9b : profile dans le régime permanent  
 $t=15s$

### 2. Variation de la perturbation (Concentration du CO<sub>2</sub> à l'entrée):

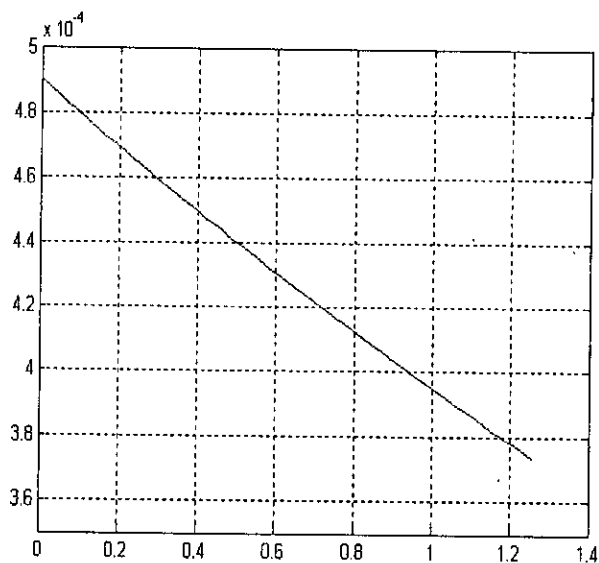


Figure II-10a : profile dans le régime transitoire  
 $t=1s$

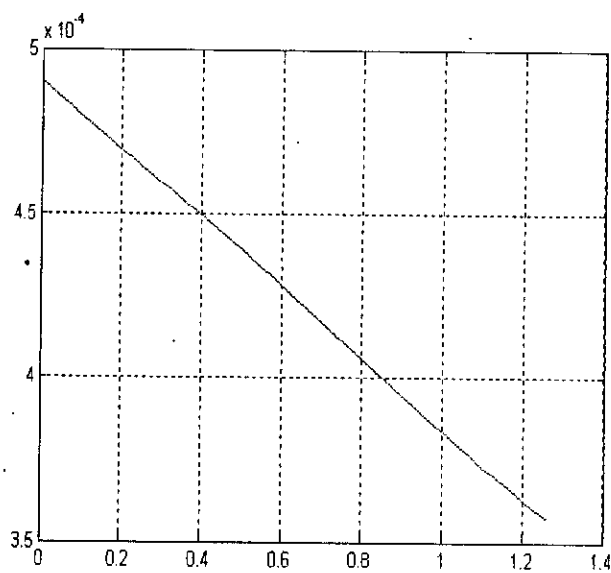


Figure II-10b : profile dans le régime permanent  
 $t=15s$

## 2.5. Interprétation :

- En appliquant une entrée échelon sur la concentration (signal perturbateur) et le débit (signal de commande) la concentration, Signal régulé, à la sortie de la colonne commence à augmenter, ou à descendre selon le signe de l'échelon (Figure II-4g ; Figure II-4h ; Figure II-5g ; Figure II-5h), jusqu'à atteindre une valeur fixe ce qui nous ramène à distinguer deux régimes dans la réponse : un régime transitoire et un régime permanent (Figure II-4a,h ; Figure II-5a,h). La réponse est donc *stable* et a une dynamique importante,  $T_r=5s$ , comparée à d'autres systèmes de nature différente, mais qui reste normal pour un procédé chimique.
- La relation entre la perturbation est la sortie est de type  $+y=f(+e)$ , (Figure II-4a,h), ce qui est attendu puisqu'une augmentation, ou diminution, de la concentration du  $CO_2$  à l'entrée se propage jusqu'à la sortie en engendrant le même effet dans tous les points.
- La relation entre l'entrée et la sortie est de type  $-y=f(+u)$ , (Figure II-5a,h), ce qui est justifié par l'absorption du  $CO_2$  par la MEA.
- L'effet de la variation du débit sur la concentration est instantané, (Figure II-5a,h), alors que celui de la perturbation ne l'est pas (Figure II-4a,h).
- Le temps de retard (temps mort) pris par la perturbation pour prendre effet est décroissant tout au long de la colonne (Figure II-7a,h). Il devient instantané à l'entrée de la colonne ( $z=0$ ) (Figure II-7h). En effet, c'est le point d'application de la perturbation.
- Le point précédent peut nous ramener à faire l'analogie et prévoir une croissance du temps de réponse, du haut en bas de la colonne, vis-à-vis le débit mais les résultat des figure (Figure II-8a,h) donnent une réponse instantanée tout au long de la colonne. La justification que nous avons donnée à ce phénomène est : contrairement à la concentration du  $CO_2$ , le changement du débit est instantané sur toute la colonne : dire que le débit a une valeur dans un point donné veut forcément dire que tout les autres points ont cette même valeur, pour vérifier le principe de conservation de la matière (ce qui entre=ce qui sorte).
- La concentration est décroissante du bas en haut de la colonne dans toute instant (Figure II-9a,b ; Figure II-10a,b) et ce parce que la MEA et le  $CO_2$  circulent en contre courant. Le liquide est injectée par le haut, il arrive saturé en bas, et il absorbe donc moins du gaz.
- Le temps mort théorique de propagation de la variation de concentration est :

$$T_m(th) = \frac{l}{U_g} = \frac{L}{G} S \Rightarrow T_m(th) = \frac{1.26}{0.0031} 0.0044 = 0.55s$$

Ce qui est proche de celui trouvé par simulation  $T_m(sim) = 0.5s$  (Figure II-7a) ce qui confirme encore la validité de la simulation.

### 3. Conclusion :

Dans cette section on a essayé d'évaluer le régime dynamique de notre système, tout en visant à extraire le maximum d'informations dans l'importance est primordiale quant à la commande et à l'identification de celui-ci.

Les diverses excitations auxquelles notre système a été soumis ont pu nous divulgué les différents aspects structurelles de notre système, à savoir :

- Le système est non-linéaire
- Le temps de réponse  $t_r=3s$
- La stabilité du système en boucle ouverte (stable).
- L'influence de la perturbation et la commande sur le système.

Qui vont être exploités à fin de mener à bien l'identification et la commande de la colonne.

# Chapitre III

## Identification de la colonne d'absorption

---

« Dédurre les modèles en partant des observations et étudier leurs propriétés est vraiment ce que la science est pour » [Ljung]. Les modèles peuvent avoir un caractère plus ou moins formel, mais ils ont la caractéristique de lier les observations ensemble dans un seul contexte. L'identification des systèmes traite le problème de construction modèle mathématique d'un système dynamique basée sur les données observées à partir de ce système.

Dans ce chapitre une idée générale est fournie sur l'identification suivi de l'application de cette technique sur la colonne d'absorption et finissant par l'interprétation des résultats obtenus à partir des différents essais.

### **1. Généralités sur l'identification :**

#### **1.1. Les entités de base de l'identification :**

La construction d'un modèle à partir des données implique trois entités de base :

##### **1.1.1. L'enregistrement de données :**

Les données E/S sont souvent enregistrées durant une expérience spécifique d'identification, où l'utilisateur doit déterminer quels signaux à mesurer et quand les mesurer et doit aussi choisir les signaux d'entrées. L'objectif de l'étude expérimentale est donc de faire ces choix de telle sorte à ce que les données soient le plus possible *instructives*.

### 1.1.2. La structure du modèle :[3]

Une série de modèles candidats est obtenue par la spécification dans quelle collection de modèles on va chercher le modèle approprié. Il n'y a aucun doute que c'est la plus importante et, dans le même temps, le plus difficile choix de la procédure d'identification. Ici, une connaissance priori et une intuition d'ingénierie doivent être combinées avec les propriétés formelles du modèle. Parfois, la structure du modèle est obtenue après une modélisation *prudente*. Ensuite, un modèle avec quelques paramètres physiques inconnus est construit à partir des lois de physiques. Dans d'autres cas des modèles standard linéaires peuvent être employés, sans référence au contexte physique. un tel modèle, dont les paramètres sont vus comme des véhicules d'ajustage la bonneté des données et ne reflètent pas les considérations physiques du système, est appelé *une boîte noire*. Les modèles avec des paramètres ajustables qui ont une interprétation physique sont appelés *boîtes grises*. D'une façon générale, une structure de modèle est une projection paramétrée des E/S antérieures vers l'espace des sorties du modèle.

### 1.1.3. Détermination du meilleur modèle :

Ceci est la méthode d'identification. L'évaluation de la qualité du modèle est typiquement basée sur comment les modèles réagissent quand ils tentent de reproduire les données mesurées.

### 1.1.4 La validation du modèle :

Une fois qu'un choix de modèle est établi, il est temps de tester si ce dernier est *suffisamment bien*. On appelle ce type de tests *validation d modèle*. Ils impliquent plusieurs procédures pour estimer comment le modèle relie les données observées, aux connaissances préalables, et à son utilisation future. Un comportement insatisfaisant du modèle dans ces considérations nous ramène à rejeter le modèle, alors qu'une bonne performance développera une certaine confiance en lui. Un modèle ne peut jamais être accepté comme une description finale et correcte d'un système. Plutôt, il vaut mieux le voir comme une bonne et suffisante description à certains aspects qui ont un intérêt particulier pour nous.

## 1.2. La boucle d'identification :

La procédure d'identification des systèmes a un flux logique : premièrement collecter les données, ensuite choisir une configuration du modèle, enfin adopter le meilleur modèle dans cette configuration. Il est tout à fait possible, pourtant, que ce modèle obtenu dès la première fois ne passe pas le test de validation. On doit retourner en arrière et réviser les différentes étapes de la procédure. Le modèle peut être insatisfaisant pour des raisons différentes :

- La procédure numérique a échoué à trouver le meilleur modèle répondant à nos critères.
- Le critère n'a pas été bien choisi.
- La configuration du modèle n'est pas appropriée, elle ne contient pas une description suffisante du système.
- Les données n'ont pas été suffisamment instructives pour permettre le bon choix du modèle.

La partie principale de l'identification en effet consiste à résoudre ces problèmes, en particulier le troisième.

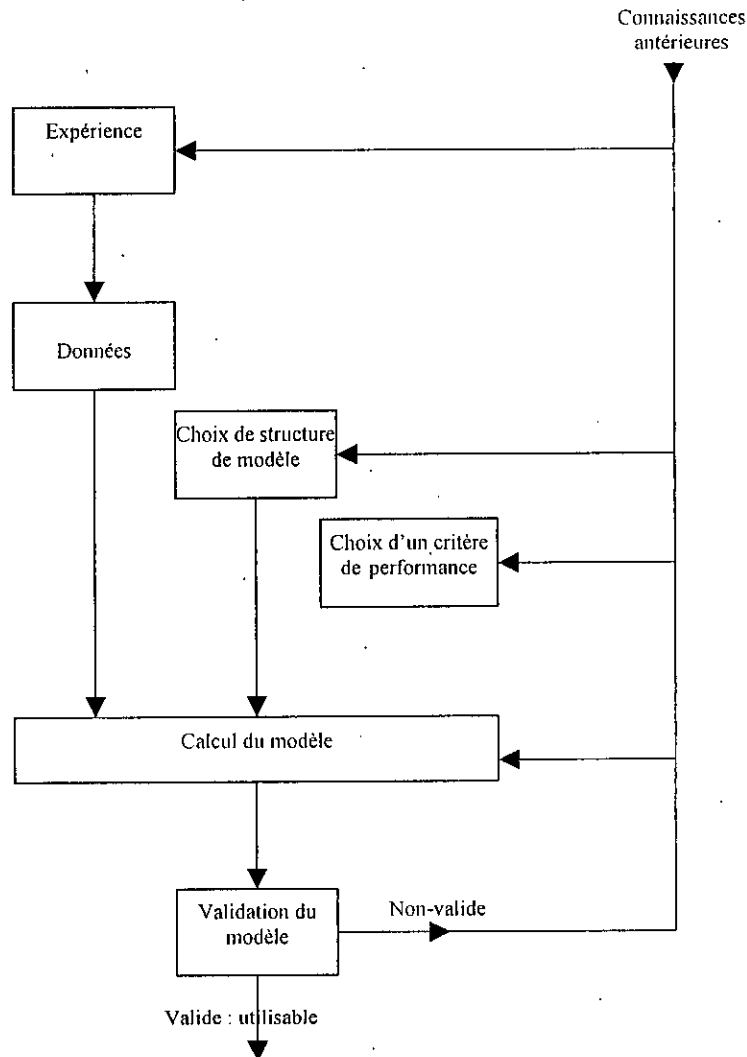


Figure III-1 : La boucle d'identification [3]

### 1.3. Les méthodes d'identification : [20] [3]

On distingue deux types de méthodes d'identification : Les méthodes non-paramétriques et les méthodes paramétriques.

#### 1.3.1. Les méthodes non-paramétriques :

Visent à estimer le comportement du système, par des techniques directes sans un choix limité préalable des structures possibles du modèle. La nomination *non-paramétrique* vient du fait qu'elles n'emploient pas, explicitement, un vecteur de

paramètres dans la recherche de la meilleure description. Typiquement, les méthodes non-paramétrique incluent l'analyse de corrélation qui estime la *réponse impulsionnelle*, et l'*analyse spectrale* qui estime la *réponse fréquentielle du système*.

### 1.3.2. Les méthodes paramétriques :

Sont des techniques qui estiment les paramètres  $\theta$  dans une structure de modèle donnée. Principalement, c'est trouver, numériquement, les valeurs des paramètres  $\hat{\theta}$  qui donnent le meilleur modèle (sec 1.2.). En général, ceci est réalisé par la minimisation de l'erreur de prédiction, on parle alors de *prediction-error identification methods (PEM)*, d'où vient le critère :

$$\hat{\theta} = \min(\ell(L(q).\varepsilon(t, \theta))) \quad (3.1)$$

où :  $\ell(.)$  est une norme. En général c'est la norme quadratique ( $\ell(\varepsilon) = \frac{1}{2} \varepsilon^2$ ) vu sa

commodité pour les calculs et l'analyse.

$L(q)$  est un filtre linéaire stable. Atténue l'effet du bruit de haute fréquence ou les termes qui ont une lente dynamique et qui ne sont pas essentiels dans la modélisation

et 
$$\varepsilon(i) = y(i) - \varphi^T(i)\hat{\theta} \quad (3.2)$$

Des méthodes particulières, qui ont des noms spécifiques, sont obtenus comme des cas particuliers de (3.1), selon le choix de  $\ell(.)$ , le pré-filtre  $L(q)$  (moindres carrées *Least squares LS*), la structure du modèle (méthodes d'estimation d'espace d'état *subspace method*) et, dans plusieurs cas, le choix de la méthode de minimisation (introduction de la variable instrumentale...).

La sortie estimée du processus dans le pas  $k$  :  $\hat{y}_k$  est calculée en se basant sur les entrées et les sorties précédentes du processus selon le schéma suivant :

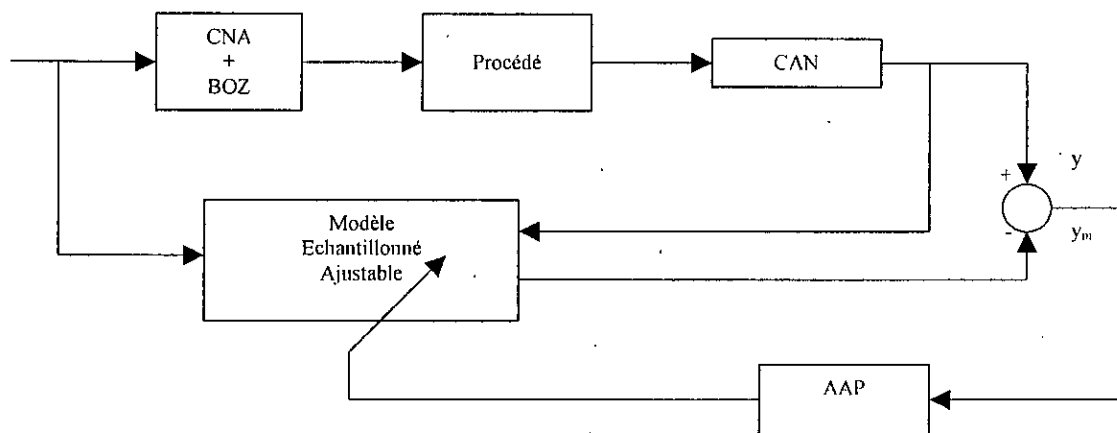


Figure III-2 : Schéma général d'identification



Plusieurs algorithmes sont proposés, on cite entre autres l'algorithme des moindres carrés récursif qui est donné par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t+1) &= \hat{\theta}(t) + F(t)\Phi(t)\varepsilon(t+1) \\ F(t+1) &= F(t) - \frac{F(t)\Phi(t)\Phi'(t)F(t)}{1 + \Phi'(t)F(t)\Phi(t)} \\ \varepsilon(t+1) &= \frac{y(t+1) - \hat{\theta}(t)\Phi(t)}{1 + \Phi'(t)F(t)\Phi(t)} \\ \hat{y}_k &= \theta_{k-1}'\Phi_k \\ \hat{\theta}_{k-1} &= [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m]^T \\ \Phi_k &= [-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, u_{k-d-1}, \dots, u_{k-d-m}]^T \end{aligned} \quad (3.3)$$

## 2. Identification de la colonne d'absorption :

Pour cette fin nous avons conçu le modèle *SIMULINK* (figure III-4). Il n'effectue pas l'identification proprement dite mais fournit les données E/S nécessaires. Ainsi l'identification s'effectue en deux étapes : 1-Collecte des données à l'aide du modèle *ColabSimIdent*. 2-L'identification à l'aide de l'interface *Matlab Ident*.

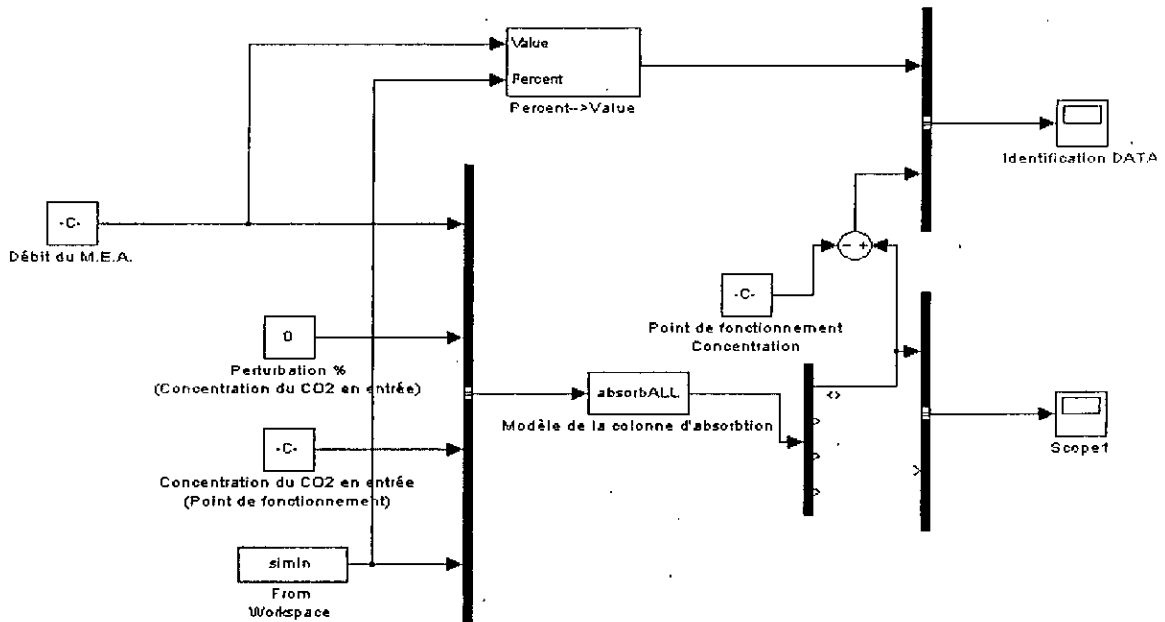


Figure III-3 : Modèle de collecte de données *ColabSim\_Ident*

### 2.1. Fonctionnement du modèle de collecte des données :

Une SBPA est injectée à l'entrée du modèle. Cette SBPA est chargée, à partir de l'espace de travail, dans la variable *simin*, des valeurs de variation du débit en pour cent, à l'aide de la fonction Matlab *idinput*.

Le bloc *Pour cent* → *Valeur*, connecté au bloc *identification Data*, convertit le pourcentage en valeur du débit. Le bloc *sum* soustrait la valeur du point de fonctionnement de la valeur de la concentration obtenue à la sortie du modèle de la colonne. Le résultat est connecté au bloc *identification Data*. L'oscilloscope *identification Data* est configuré, double cliquez sur l'oscilloscope ; cliquez sur le bouton *parameter* configurez l'onglet *Data history*, de telle sorte à ce qu'il enregistre les données qui lui proviennent dans une variable de l'espace de travail appelée *DataID*.

## 2.2. Identification à l'aide de l'outil Ident :

L'appel de l'interface *ident*, (Figure III-4), se fait dans l'environnement Matlab par la fonction *ident*. Pour importer les données E/S : Déroulez la liste *Data* ; cliquez sur *import Data*. Une fenêtre s'affiche, (Figure III-5). Saisissez les zones de textes *Input* et *Output* comme dans la (Figure III-5), et l'importation des données est faite en cliquant sur *Import*.

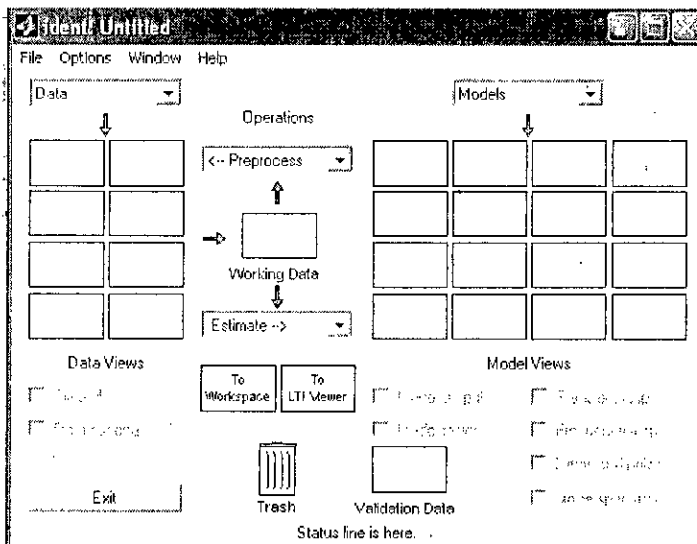


Figure III-4 : L'interface ident

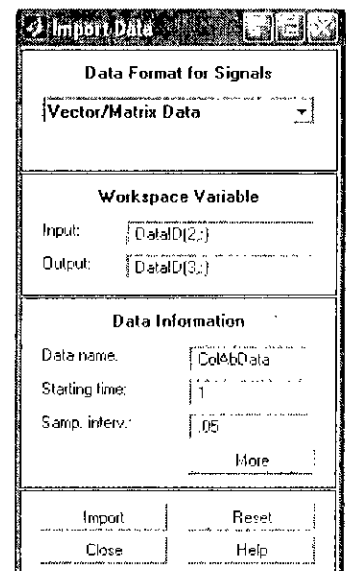


Figure III-5 : Data import

Une fois les données sont importées cliquez sur *estimate* → puis *Parametric Models...* une fenêtre (Figure III-6) permet, entre autres, de choisir la structure et le degré du modèle. Un click sur le bouton *Estimate* lance l'identification et le modèle

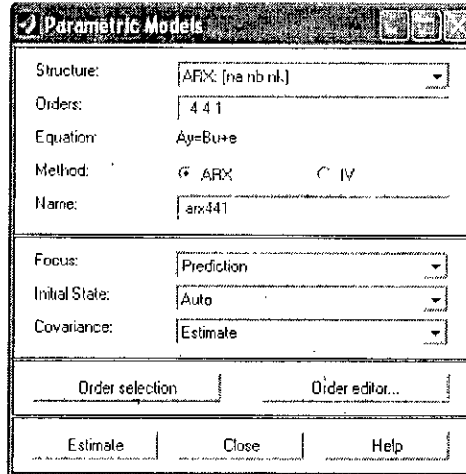


Figure III-6 : Choix de l'ordre du modèle

### 3. Mode opératoire et résultats:

Nous avons effectuée l'identification pour différent ordres du modèle *ARX* et ceci pour un pas d'échantillonnage de *.1s* et *.5s* puis visualiser :

- les sorties du modèle *simulée* et *mesurée* dans un même plan.
- Les pôles et les zéros de chaque modèle et leurs positions par rapport au cercle unité.

Les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit:

Tableau III-1 : Taux de correspondance entre la sortie mesurée et la sortie estimée pour un temps d'échantillonnage :  $T_e=.5$  ; modèle *ARX*

Ordre	3	10	20	30	33	35	40
Taux de (%) correspondance	25.86	35.64	54.94	79.01	87.85	88.50	97.71

Tableau III-2 : Taux de correspondance entre la sortie mesurée et la sortie estimée pour un temps d'échantillonnage :  $T_e=.1$  ; modèle *ARX*

Ordre	3	10	20	30	40	50	60
Taux de (%) correspondance	31.85	34.85	35.68	39.67	41.91	41.97	53.72

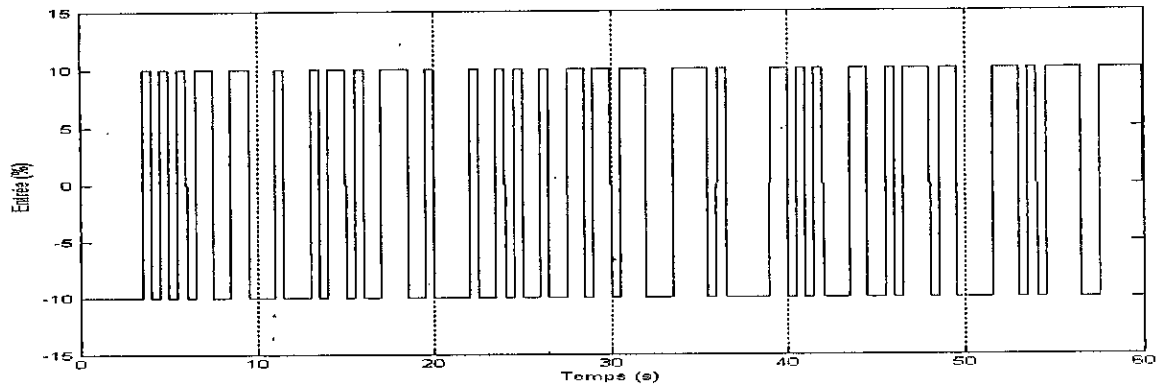


Figure III-7 : SBPA injectée à l'entrée de la colonne

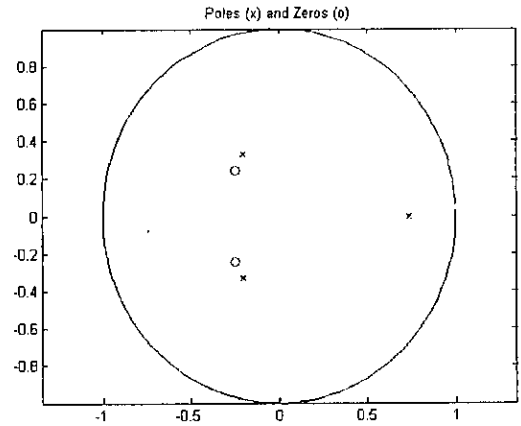
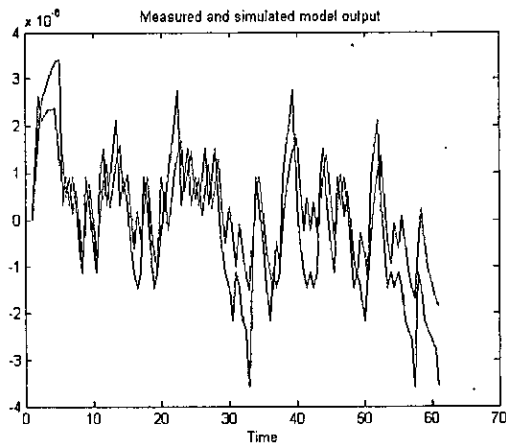


Figure III-8a : ordre [3 3 1]

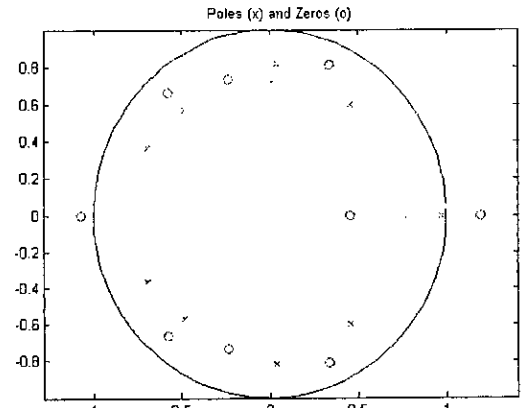
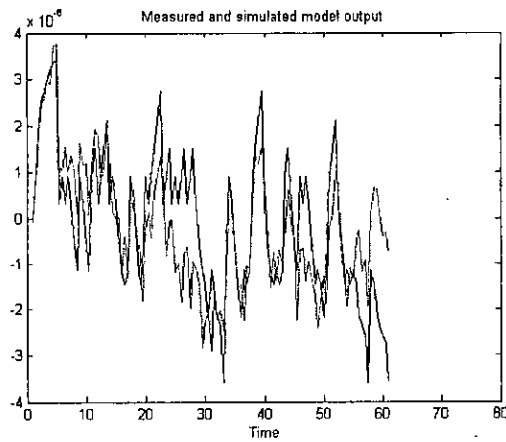


Figure III-8b : ordre [10 10 1]

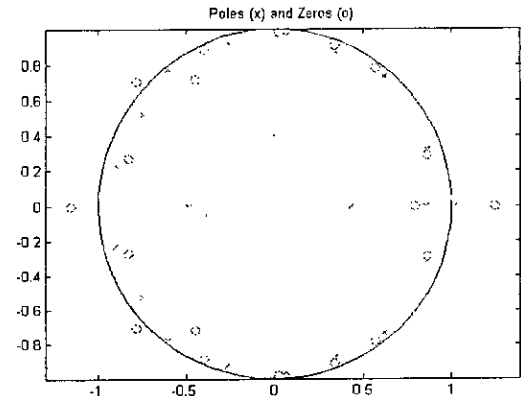
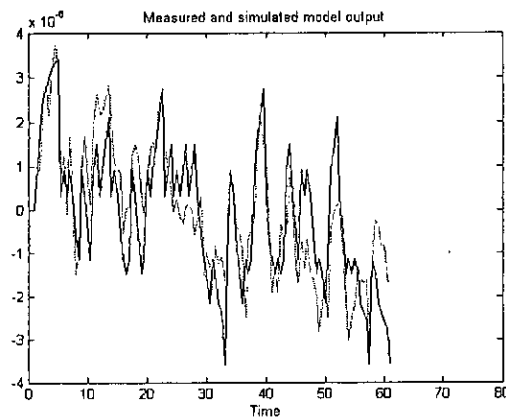
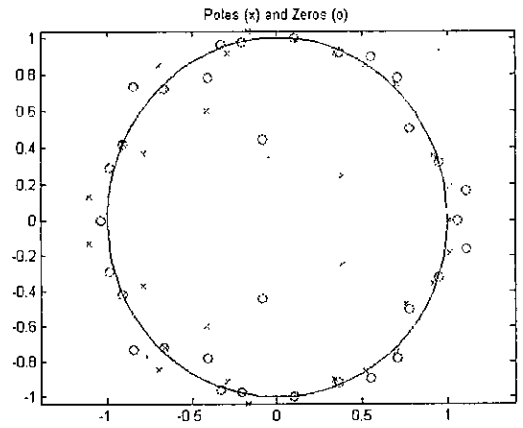
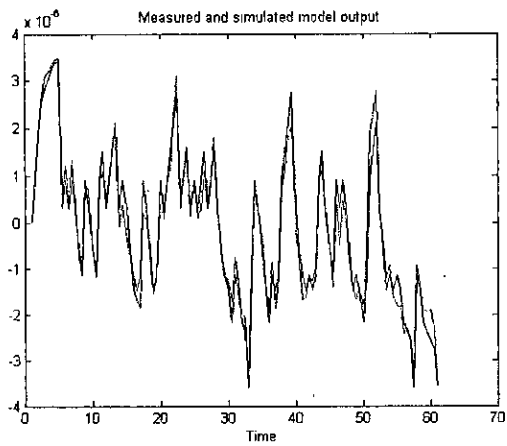
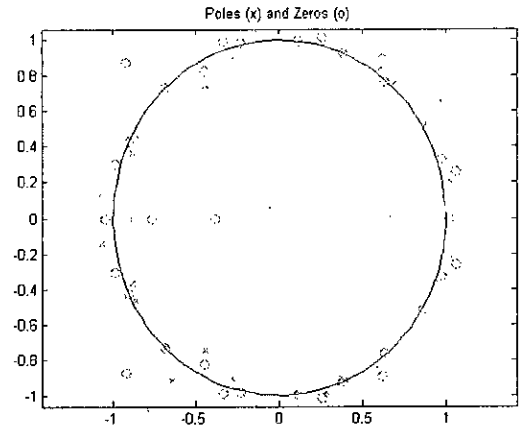
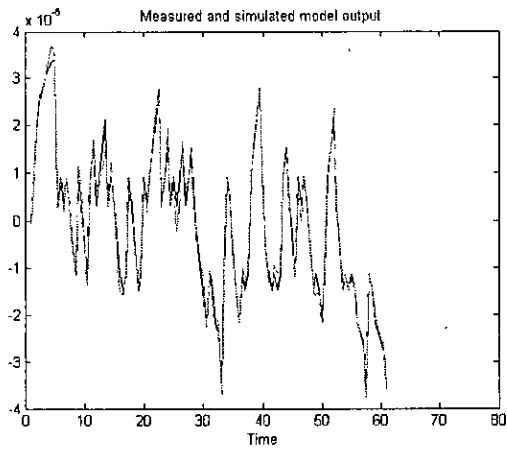


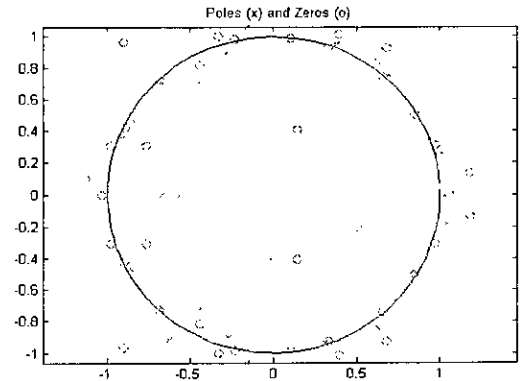
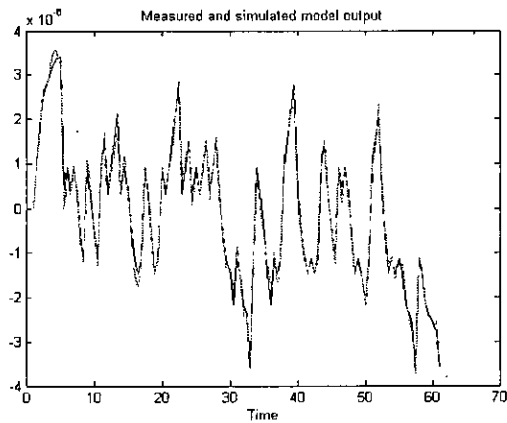
Figure III-8c : ordre [20 20 1]



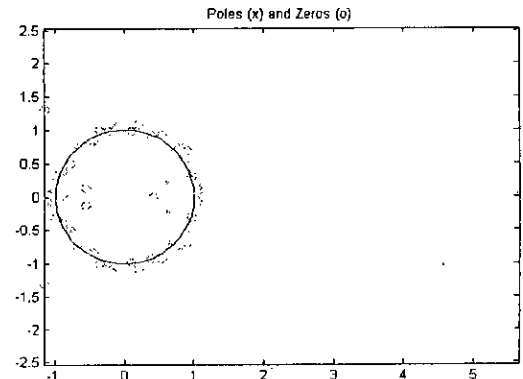
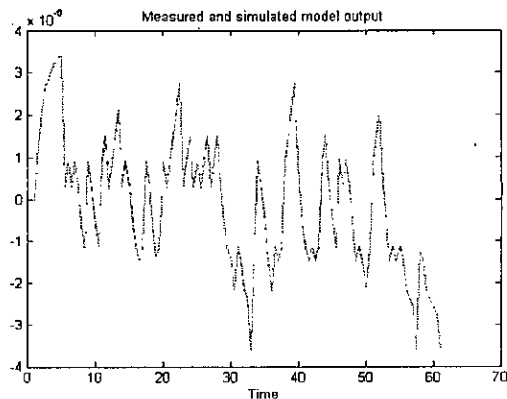
**Figure III-8d : ordre [30 30 1]**



**Figure III-8e : ordre [33 33 1]**



**Figure III-8f : ordre [35 35 1]**



**Figure III-8g : ordre [40 40 1]**

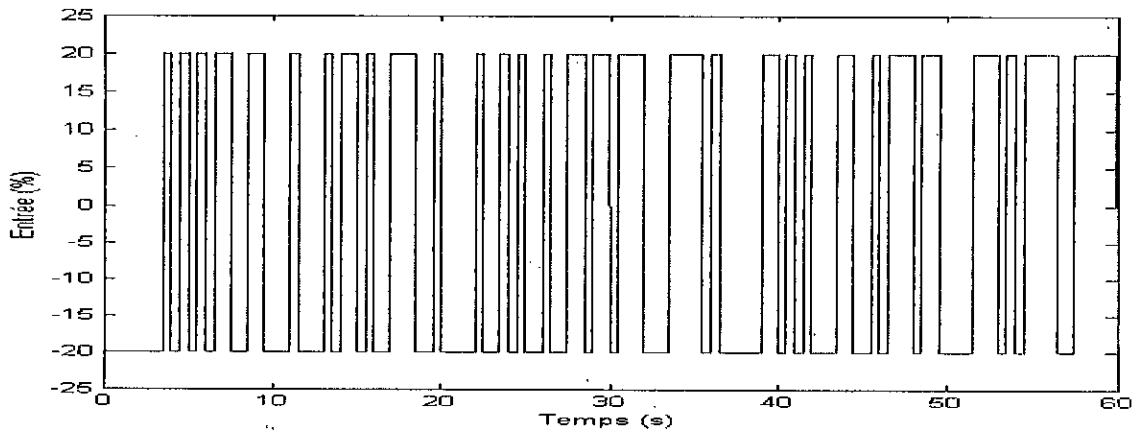


Figure III-9 : SBPA injectée à l'entrée de la colonne

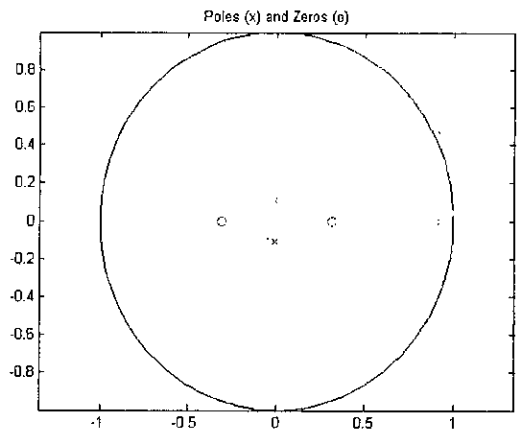
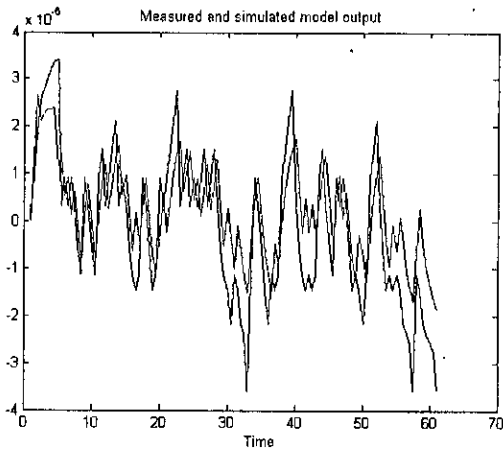


Figure III-10a : ordre [3 3 1]

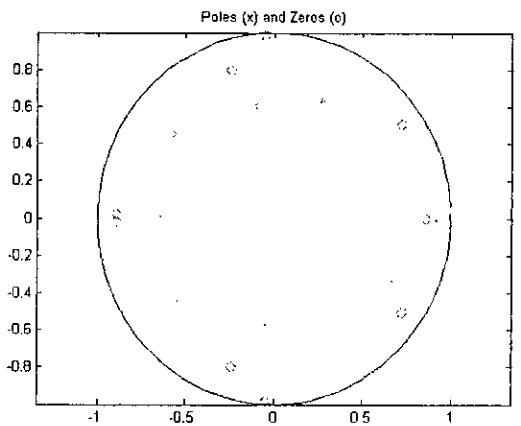
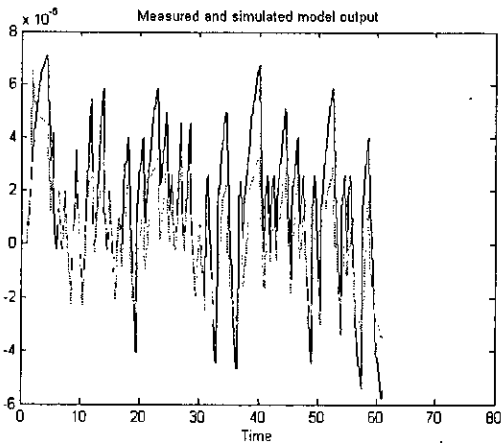


Figure III-10b : ordre [10 10 1]

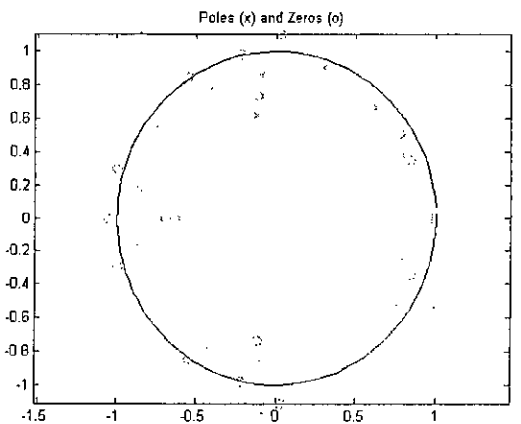
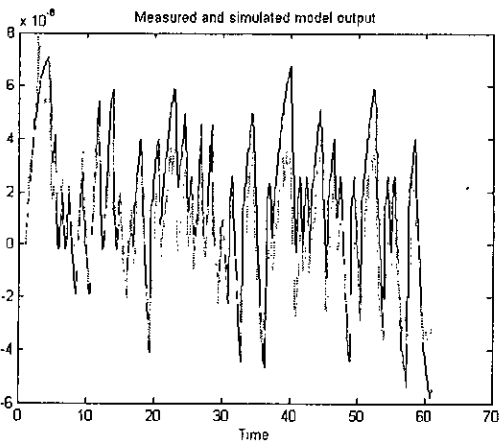


Figure III-10c : ordre [20 20 1]

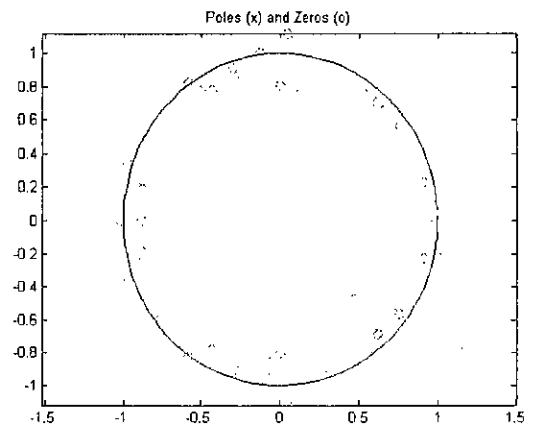
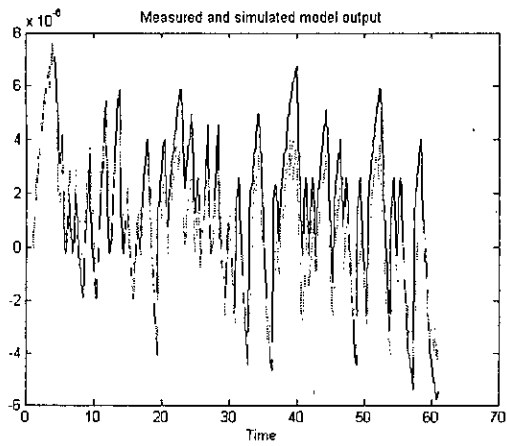


Figure III-10d : ordre [30 30 1]

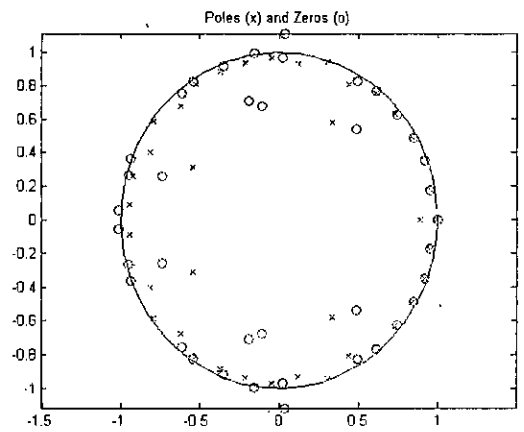
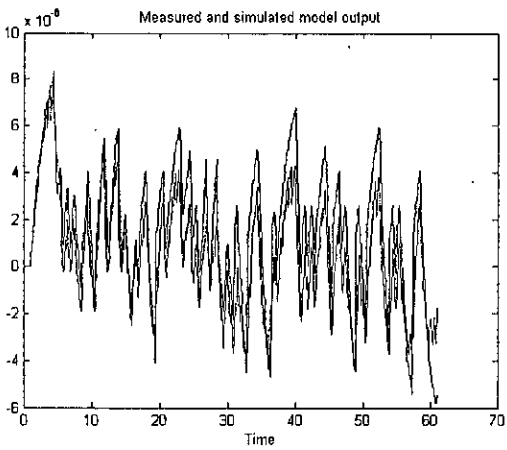


Figure III-10d : ordre [40 40 1]

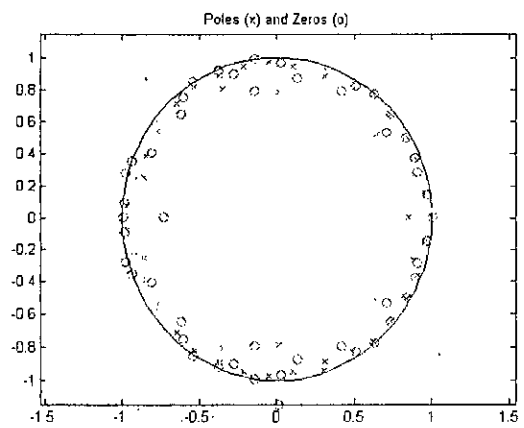
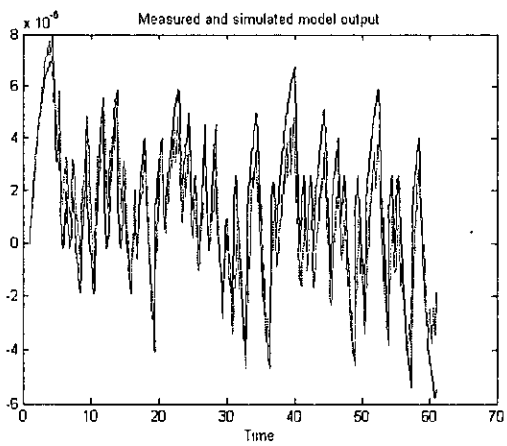


Figure III-10c : ordre [50 50 1]

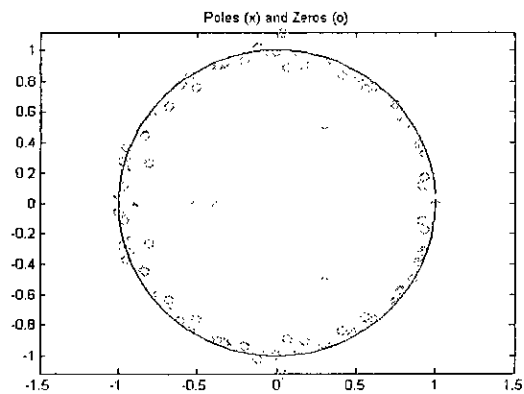
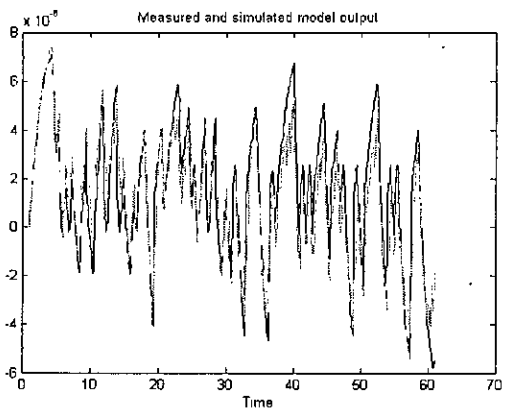


Figure III-10c : ordre [60 60 1]

#### 4. Interprétations et commentaires:

- Une meilleure estimation est obtenue en augmentant l'ordre du système (FigureIII-8g) au prix de tendance des pôles et des zéros, de plus en plus vers la limite de stabilité (FigureIII-8d,f)et se déstabilise pour des ordre supérieurs (FigureIII-8g).
- La diminution du temps d'échantillonnage abaisse la qualité d'estimation, comparer Figure III-8 avec Figure III-9 et Tableau III-1 avec Tableau III-2, pour le même ordre. Un pas d'échantillonnage plus petit en résulte une plus grande quantité des données E/S, ce qui rend difficile l'atteinte rapide d'une bonne qualité d'estimation .
- De ce qui précède on voit qu'une bonne estimation du modèle de la colonne est obtenue pour des ordres importants ce qui nous ramène à prévoir la difficulté de l'implémentation de la commande adaptative puisque cette dernière fait appel à l'identification en temps réel. Compte tenu des exigences pratiques de la commande (temps de calcul, complexité des calculs,...), nous adoptons pour la commande le modèle *ARX*, obtenu par identification, du 2<sup>ème</sup> ordre suivant :

$$G(z^{-1}) = \frac{-0.6821z^{-1} - 0.30609z^{-2}}{1 - 0.25381z^{-1} - 0.32064z^{-2}} \quad (3.3)$$

#### 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue quelques aspects généraux de l'identification. Les essais effectués précédemment nous ont amenée au résultat important suivant : un bon estimé du modèle de la colonne d'absorption est obtenu pour des ordres importants (supérieur à trois) ce qui nous ramène à prévoir la difficulté de l'étape suivante dans notre étude dont l'identification joue un rôle dominant.



# Chapitre IV

## Application de la commande adaptative à la colonne d'absorption

---

Le bon sens de *adapter* est de changer des comportements pour les ajuster avec des nouvelles circonstances. Intuitivement, un régulateur adaptatif est donc un régulateur qui peut modifier son comportement, en réponse à des changements engendrés sur la dynamique du processus. [5]

Dans le sens de la théorie de commande, une commande est dite adaptative si les paramètres du régulateur peuvent être ajustés en fonction des paramètres estimés du procédé à commander. La synthèse d'un régulateur se fait normalement en utilisant la connaissance à priori du procédé. Lorsque les paramètres du système à commander sont mal connus ou varient légèrement dans le temps, on peut faire appel à une commande adaptative. [6]

### 1. Historique :

Au début des années cinquante les recherches concernant la commande adaptative ont été abordées. La motivation primaire été l'amélioration pour le pilotage automatique des aéronefs. [7]

L'apport essentiel pour la compréhension des systèmes adaptatifs fut concrétisé par la programmation dynamique introduite par BELLMAN « 1964 » et la théorie de la commande duale introduite par FELDBAUM « 1965 », d'autres contributions fondamentales

furent apportées par TSYPKIN « 1973 », comme il y a eut également des contribution d'importance grande en identification des systèmes. [7]

Au début des années « 1980 », des essais et des études sur la stabilité des systèmes adaptatifs ont été réalisés, sous des suppositions et des idées limitées. Les recherches sur ces suppositions a créer des explorations intéressantes dans le domaine de la robustesse de la commande adaptative. [8]

Au cours des années 1990, la recherche a donné la nouvelle perspicacité dans la robustesse des régulateurs adaptatifs. Les études sur les systèmes non linéaires ont aussi mené à une augmentation considérable sur la compréhension des régulateurs adaptatifs. La théorie de la commande adaptative a été bien établie et représentée en 1990. Notamment à la conception du régulateur adaptatif robuste qui entraîne des modifications sur les lois de la commande adaptative, ces modifications sont proposées pour les deux types de la commande, directe et indirecte, sur tout dans le point de vu normalisation. [8]

## 2. Les différentes techniques de la commande adaptative :

### 2.1. Commande adaptative en boucle ouverte :

La commande adaptative a été introduite initialement en boucle ouverte. L'adaptation se fait en fonction de variables auxiliaires. Dans ce cas il n'y a pas de mesure sur les performances de la boucle fermée [9]

Le gain programmé est un exemple de la commande adaptative en boucle ouverte. Dans cette approche, le bloc d'adaptation contient une table de gains disponibles utilisée par le régulateur pour un changement du gain du processus. [9]

Le schéma illustratif de cette approche est montré dans la figure ci-dessous :

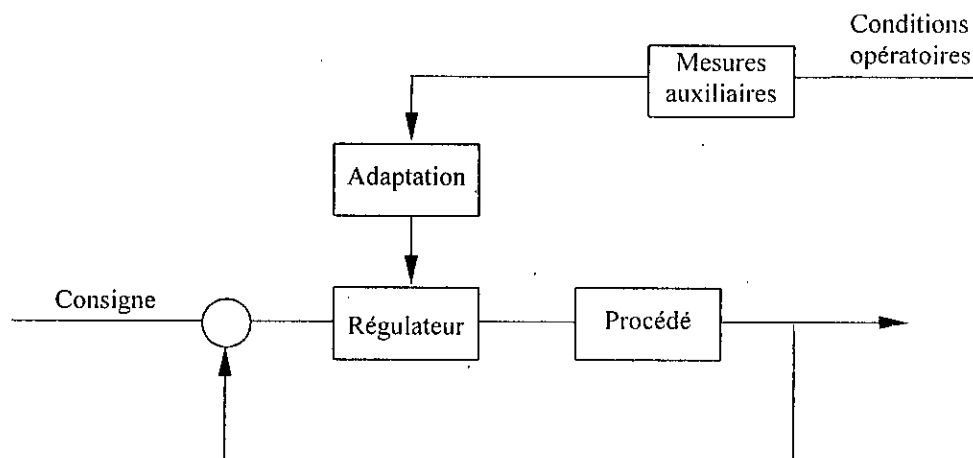


Figure IV-1 : Schéma de la commande adaptative à gain programmé

Cette approche nous garantie une adaptation par rapport aux variable auxiliaires, mais ne permet pas de contrôler totalement l'effet de perturbations paramétrique. [9]

Les résultats de ces schémas peuvent être bons, dans le cas où les variables auxiliaires sont suffisamment reliées aux caractéristiques dynamiques du procédé, mais les performances se détériorent rapidement si ces relations changent au cours du temps. Un autre problème du gain programmé réside dans l'évaluation des variables auxiliaires. Cette opération peut nécessiter des capteurs additionnels. [9]

Nous notons que dans ces schémas, il n'y a pas de boucle de contre réaction sur la mesure des performances du système.

## **2.2. Commande adaptative en boucle fermée :**

Le major des études théoriques et pratiques ont été développées à partir de schémas de commande adaptative en boucle fermée. Il existe deux types de schéma de commande adaptative :

- La commande adaptative directe (ou implicite) .
- La commande adaptative indirecte(ou explicite) .

Le premier cas ne comporte qu'une seule étape à chaque pas d'échantillonnage, les paramètres du régulateur sont directement ajustés en fonction des mesure d'erreur de performances. Dans ces schémas, on identifie en fait, implicitement le procédé mais réparamétriser en terme du régulateur. Dans le seconde cas, l'adaptation se fait en deux étapes, les paramètres du modèle du procédé sont estimés en première phase puis dans une deuxième phase les paramètres du régulateur sont calculés à partir des paramètres estimés. [9]

La deuxième méthode nécessite un volume de calcul plus important, mais son domaine d'application est beaucoup plus large. [9]

A titre d'exemple, nous allons présenter deux schémas de commande adaptative, l'un directe et l'autre indirecte. [9]

### **2.2.1. Commande adaptative à modèle de référence (Directe) :**

Dans cette approche, les performances désirées sont réalisées sous la forme d'un modèle à suivre. L'écart entre la sortie du système et celle du modèle est utilisé par un régulateur d'adaptation pour faire varier les paramètres du régulateur , dans le but de réaliser la meilleure poursuite possible (minimiser l'écart). [9]

Le schéma bloc du système est montre par la figure ci-après :

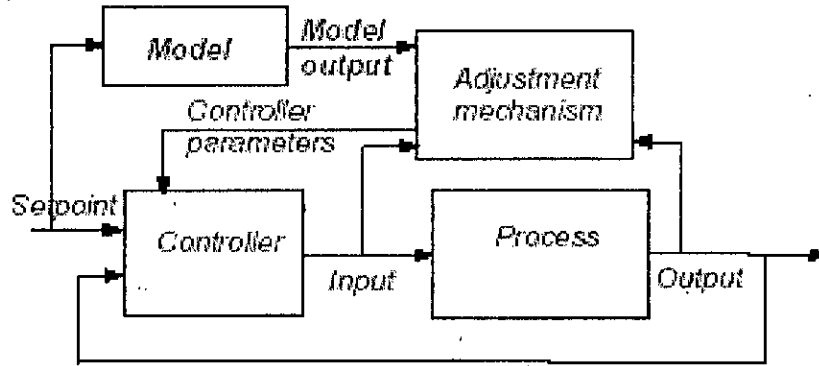


Figure IV-2: Schéma de la commande adaptative à modèle de référence

Comme simple manière de produire un régulateur adaptatif à modèle de référence est de commencer à varier la matrice de gain  $k(t)$ . Cette méthodologie est applicable aux plusieurs approches, parmi eux la règle de MIT qui est probablement la plus classique. Dans le cas de la règle de MIT le gain est choisi pour minimiser la fonction de perturbation suivante [5] :

$$J(k(t)) = 0.5e^2(t) \quad (4.1)$$

pour rendre  $J(k)$  petit nous devons changer  $k(t)$  vers la direction gradient négatif :

$$\frac{\partial k(t)}{\partial t} = -\eta \frac{\partial J(k(t))}{\partial k(t)} = -\eta e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial k(t)} \quad (4.2)$$

Où  $\partial e(t)/\partial k(t)$  est dérivé partiel appelée la dérivé du sensibilité de système.

Comme exemple, on considère que le problème de procédé de SISO dont son gain est inconnu ( $p(s) = p_o(s)$ , d'où  $p_o(s)$  s'est ce qu'on appelle le procédé nominal). On applique la règle de MIT pour trouver le vecteur paramètre de régulateur quand le gain  $k$  inconnu. Le modèle de procédé est  $p_m(s) = k_o p_o(s)$ , d'où  $k_o$  est une constante donnée. Dans ce cas l'erreur est définie comme suit [5] :

$$e(t) = y(t) - y_m(t) = kp(l)\theta r(t) - k_o p(l)r(t) \quad (4.3)$$

Où  $y(t)$ ,  $y_m(t)$ ,  $r(t)$  et  $l = \frac{d}{dt}$  sont sortie de procédé, sortie de modèle de procédé et la référence, l'opérateur différentiel, respectivement. La dérivé de la sensibilité est :

$$\frac{\partial e(t)}{\partial \theta} = kp(l)r(t) = \frac{k}{k_o} y_m(t) \quad (4.4)$$

La règle MIT donne l'ajustage de  $\theta$  suivant :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\eta \frac{k}{k_o} y_m(t) e(t) = -\eta y_m(t) e(t) \quad (4.5)$$

On remarque que pour une valeur juste de signe de  $\eta$ , la connaissance de signe de  $k$  est possible. [5]

Dans le domaine de l'industrie, il y a des rapports d'instabilité basés sur la règle principale du MIT. Il est étudié que le choix de l'algorithme d'adaptation est critique et sa valeur dépend des niveaux des signaux. La normalisation de ces signaux créera une indépendance obligatoire pour cet algorithme. Donc la règle de MIT sera modifiée comme suit [5] :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \mu \phi e(t) \quad (4.6)$$

Où  $\phi = \partial e(t) / \partial \theta$ . La règle d'ajustement est [5]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\eta \phi e(t)}{\alpha + \phi^T \phi} \quad (4.7)$$

Où  $\alpha > 0$  est introduit pour éviter la division sur zéro.

### 2.2.2. Commande adaptative auto ajustable (indirecte):

Le schéma bloc d'un tel système est représenté par la Figure IV-3. Ce schéma est couramment utilisé lorsque les caractéristiques du procédé sont inconnues et variants, éventuellement avec le temps.

Le modèle du procédé est estimé en ligne, et les paramètres du régulateur sont ajustés à partir de ce modèle.

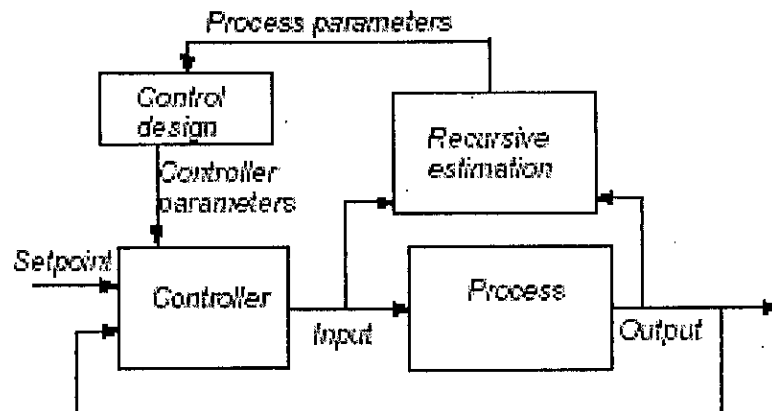


Figure IV-3 : Schéma de la commande adaptative auto-ajustable

### 2.2.2.1. L'identification réursive de la commande adaptative :

Toutes les méthodes qui utilisent le critère du moindre carrée :

$$V(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t [y(i) - x^T(i)\hat{\theta}]^2 \quad (4.8)$$

Ce dernier identifie le comportement nominal du procédé, Quand les paramètres varient dans le temps, il est désirable de baser l'identification sur les plus récentes données que les anciennes, cela peut être réaliser par l'actualisation de l'exponentiel en utilisant le critère [5] :

$$V(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} [y(i) - x^T(i)\hat{\theta}]^2 \quad (4.9)$$

Où  $0 < \lambda \leq 1$  est appelé le facteur d'oubli.

Le nouveau critère peut aussi être écrit de la manière suivante :

$$V(t) = \lambda V(t-1) + [y(t) - x^T(t)\hat{\theta}]^2 \quad (4.10)$$

Il est montré (Good Win et Payen, 1977) que l'algorithme du MCR devient :

$$\begin{aligned} \theta(t+1) &= \theta(t) + k(t+1)[y(t+1) - x^T(t+1)\theta(t)] \\ k(t+1) &= p(t)x(t+1)/[\lambda + x^T(t+1)p(t)x(t+1)] \\ p(t+1) &= \left\{ p(t) - \frac{p(t)x(t+1)x^T(t+1)p(t)}{\lambda + x^T(t+1)p(t)x(t+1)} \right\} \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Le choix du  $\lambda$ , fait le compromis entre la rapidité de la convergence et la longue durée d'estimation. L'utilisation du facteur d'oubli peut donner une complexité aux problèmes. Une petite valeur de  $\lambda$  entraîne aussi une divergence de la matrice de covariance  $p$ , la mise à jour de cette dernière devient essentiellement [5]

$$p(t+1) = \frac{1}{\lambda} p(t) \quad (4.12)$$

La matrice  $p$  croît exponentiellement, cela conduit à une variation brutale dans l'estimation des paramètres. La simple manière pour contourner ce problème est de faire varier le facteur d'oubli en fonction de l'erreur de prédiction. [5]

$$\lambda(t) = 1 - ke^2(t) \quad (4.13)$$

Dans ce cas pour des petites valeurs de  $e$ ,  $\lambda$  reste proche de 1, et pour une large variation de l'erreur de prédiction,  $\lambda$  se diminue. [5]

L'algorithme d'initialisation à facteur d'oubli exponentielle (EFRA) de Salgado, Goodwin et Middleton, permet de suivre la variation des paramètre tant que la matrice de covariance est bornée. [5]

$$\begin{aligned}\theta(t+1) &= y(t+1) - x^T(t+1)\hat{\theta}(t) \\ \hat{\theta}(t+1) &= \hat{\theta}^T(t) + \frac{\alpha p(t)x(t+1)}{\lambda + x^T(t+1)p(t)x(t+1)} e(t) \\ p(t+1) &= \frac{1}{\lambda} \left[ p(t) - \frac{p(t)x(t+1)x^T(t+1)p(t)}{\lambda + x(t+1)^T p(t)x(t+1)} \right] + \beta I - \eta p(t)^2\end{aligned}\quad (4.14)$$

Où  $I$  est la matrice identité, et  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\eta$  sont des constante. Avec EFRA la matrice de covariance est bornée dans les deux côtés :

$$\sigma_{MIN}I \leq p(t) \leq \sigma_{MAX}I \quad \forall t \quad (4.15)$$

Où :

$$\sigma_{MIN} \approx \frac{\beta}{\alpha - \mu} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{MAX} \approx \frac{\mu}{\eta} + \frac{\beta}{\mu} \quad (4.17)$$

Avec :

$$\mu = \frac{1 - \lambda}{\lambda} \quad (4.18)$$

Et  $\alpha=0.5$ ,  $\beta = \eta = 0.005$  et  $\lambda = 0.95$ ,  $\sigma_{MIN} = 0.01$  et  $\sigma_{MAX} = 10$ .

#### 2.2.2.2. Algorithme prototype de la commande adaptative indirecte:

Considérons le simple processus représenté par :

$$\hat{A}(q)y(t) = \hat{B}(q)(U(t) + V(t)) \quad (4.19)$$

Où  $\hat{A}$  et  $\hat{B}$  sont premiers entre eux ,  $\deg(\hat{A})=n$ , degré relative est  $d=\deg(\hat{A}) - \deg(\hat{B})$  ,  $V(t)$  est le bruit. Le régulateur (4.20) :

$$R(q)U(t) = T(q)y_r - S(q)y(t) \quad (4.20)$$

est utilisé pour suivre, en boucle fermée, le modèle ci-dessous:

$$A_m(q)y_m(t) = B_m(q)y_r(t) \quad (4.21)$$

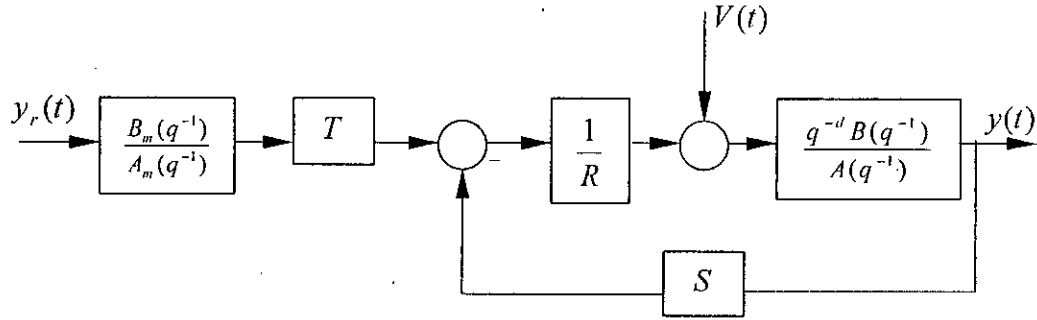


Figure IV-4 : : Structure du régulateur RST

Avec le régulateur donné par l'expression (4.20) le système en BF est :

$$y(t) = \frac{\hat{B}T}{\hat{A}R + \hat{B}S} y_r(t) + \frac{\hat{B}R}{\hat{A}R + \hat{B}S} V(t) \quad (4.22)$$

Le polynôme caractéristique de cette boucle est :

$$A_c = \hat{A}R + \hat{B}S \quad (4.23)$$

Cette équation est appelée équation de Diophantine ou l'identité de Bezout, elle joue un rôle plus important en plusieurs aspects de la théorie de la commande moderne. Le problème est donc trouver R, S et T tel que :

$$\frac{\hat{B}T}{\hat{A}R + \hat{B}S} = \frac{\hat{B}T}{A_c} = \frac{B_m}{A_m} \quad (4.24)$$

Il apparaît de l'équation précédente qu'il y a une annulation des facteurs de  $\hat{B}T$  et  $\hat{A}_c$ . Donc on factorise  $\hat{B}$  :

$$\hat{B} = \hat{B}^+ \hat{B}^- \quad (4.25)$$

Où  $\hat{B}^+$  contient les zéros stables qui peuvent être annulé, et  $\hat{B}^-$  contient les zéros instables qu'on ne doit pas les annuler. Puisque  $\hat{B}^-$  reste inchangée, il est aussi considéré que  $\hat{B}^-$  doit être un facteur de  $B_m$  donc

$$B_m = \hat{B}^- B'_m \quad (4.26)$$

Puisque  $\hat{B}^+$  est éliminé, il doit être un facteur de  $A_c$ . En outre de l'équation (4.24),  $A_m$  est aussi un facteur de  $A_c$ . Donc le polynôme caractéristique en boucle fermé peut être réécrire comme suit : [5]

$$A_c = \hat{B}^+ A_m A_o \quad (4.27)$$



Comme  $A_c$  et  $\hat{B}$  ont un facteur commun  $\hat{B}^+$ , l'équation (4.23) montre qu'il doit être aussi un facteur de  $R$ . D'où :

$$R = \hat{B}^+ R' \quad (4.28)$$

L'équation de Diophantine (4.23) peut être simplifiée, et devient :

$$\hat{A}R' + \hat{B}^- S = A_m A_o = A_c \quad (4.29)$$

avec

$$T = B'_m A_o \quad (4.30)$$

L'équation de Diophantine n'a pas de solution si  $A$  et  $B^-$  ont des facteurs communs. Si ces dernières sont premiers entre eux, Diophantine a une infinité de solutions. Il est naturel de chercher des solutions de degré minimal :

$$\deg(S) = \deg(\hat{A}) - 1 \quad (4.31)$$

Donc l'algorithme du placement des pôles est [5] :

1. Factoriser  $\hat{B}$ , en  $\hat{B} = \hat{B}^+ \hat{B}^-$ .
2. En utilisant l'équation de Diophantine, on trouve  $R'$  et  $S$  avec  $\text{Deg}S = \text{Deg}\hat{A} - 1$ .
3. Avec  $T = B'_m A_o$  et  $R = \hat{B}^+ R'$ , le régulateur est donné par :

$$Ru = Ty_r + Sy$$

### 2.2.3. Commande adaptative duale :

Dans le cas de la commande duale, introduite par FELDBAUM 1963, les paramètres inconnus sont traités comme des étapes additionnels du système, ce qui transforme même un très simple problème de commande linéaire en un problème de commande non linéaire stochastique.[9]

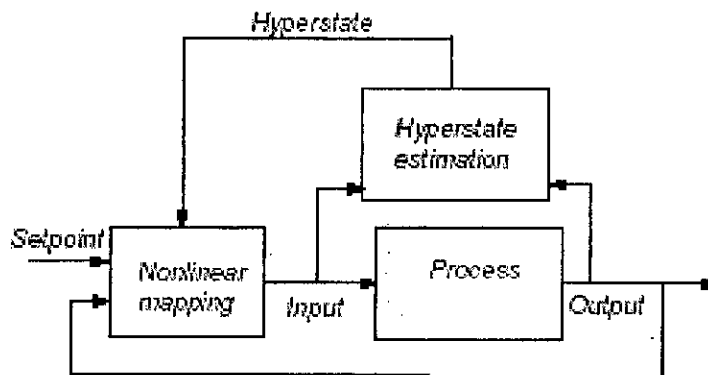


Figure IV-5 : Schéma de la commande adaptative duale

### 3. Application à la colonne d'absorption :

#### 3.1. Objectif de la commande :

La colonne d'absorption est un système non-linéaire est fonctionne autour d'un point de fonctionnement (Tableau II-1). L'objectif de la commande est de maintenir le fonctionnement autour de ce point.

#### 3.2. Commandes appliquées :

Pour voir la l'effet du choix du degré des polynômes  $\hat{A}(Z^{-1})$  et  $\hat{B}(Z^{-1})$  , nous avons utilisé la commande à modèle de référence en appliquant deux stratégies:

- 1-  $\deg(\hat{A}) = \deg(\hat{B}) = 2$ .
- 2-  $\deg(\hat{A}) = \deg(\hat{B}) = 3$ .

Trois versions de l'algorithme des moindres carrées récursives sont utilisées pour l'identification.

- 1- L'algorithme des moindres carrées classique.
- 2- L'algorithme des moindres carrées à facteur d'oubli exponentiel.
- 3- L'algorithme des moindres carrées à facteur d'oubli adaptatif et directionnel.

La perturbations est supposée entre  $-15\%$  et  $+15\%$  et le temps entre un changement et un autre est de 0.5s.

#### 3.3. Algorithme de commande :

**Etape1 :** Estimation des paramètres du système

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_m]$$

$$\phi^T(t) = [y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-m-d), \varepsilon_0(t), \dots, \varepsilon_0(t-n)]$$

$$\varepsilon_0(t+1) = y(t+1) - \hat{\theta}_t^T \phi(t)$$

**Etape 2 :** Lecture de la référence

**Etape 3 :** Calcul des paramètres du régulateur

**Etape 4 :** Calcul de la commande  $u(t)$

**Etape 5 :** Mettre  $t=t+1$  et retourner à étape 1

Cet algorithme est intégré dans le modèle Simulink *ColAb\_Control* (Figure ci-apès) :

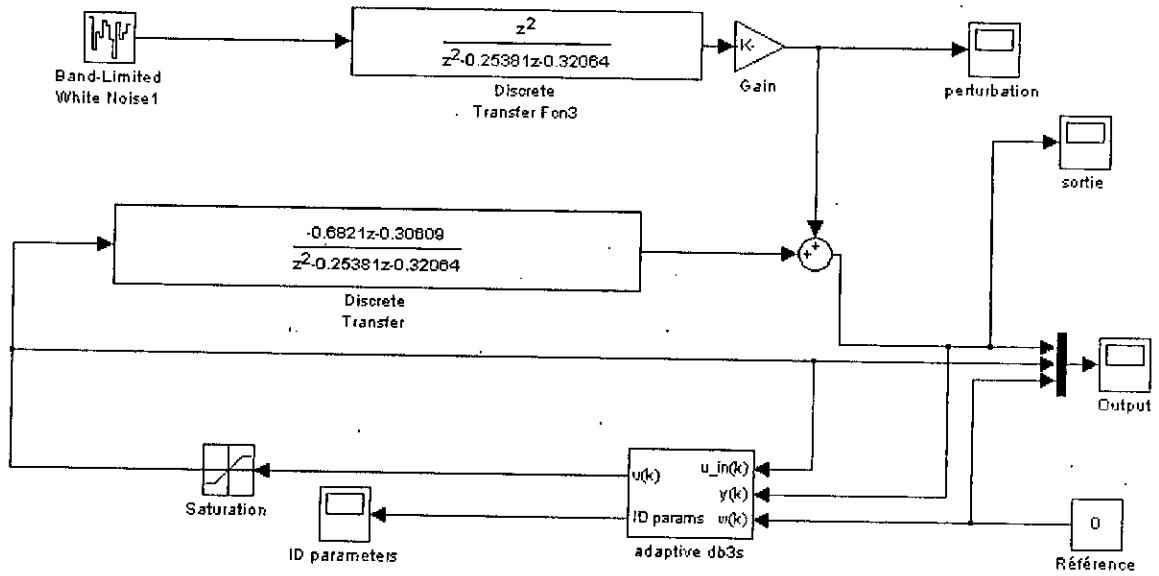


Figure IV-6 : Modèle de simulation de la boucle de commande

Les résultats de simulation sont données par les figures présentées dans les pages suivantes :

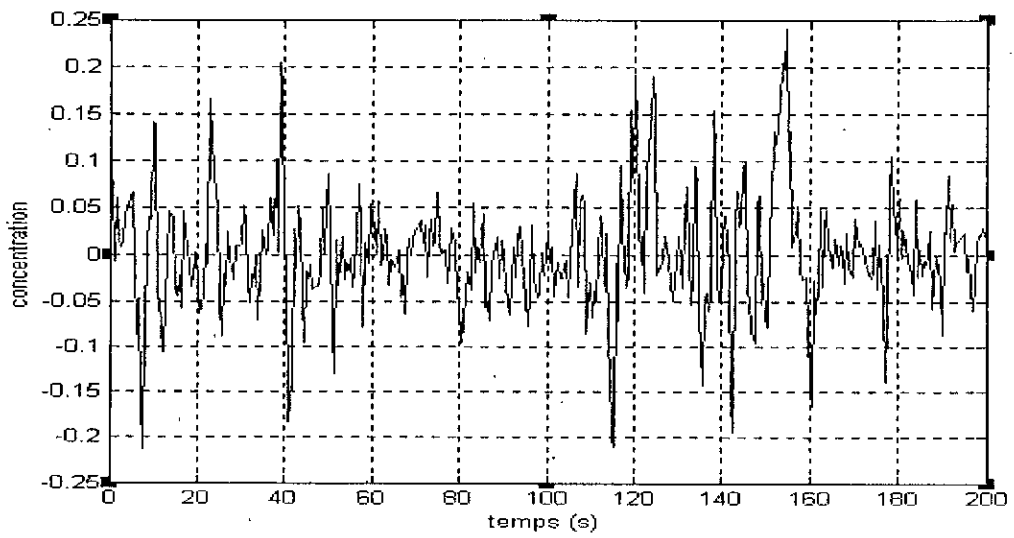


Figure IV-7a : Réponse de la sortie avec un polynôme d'estimation du 2<sup>ème</sup> ordre.

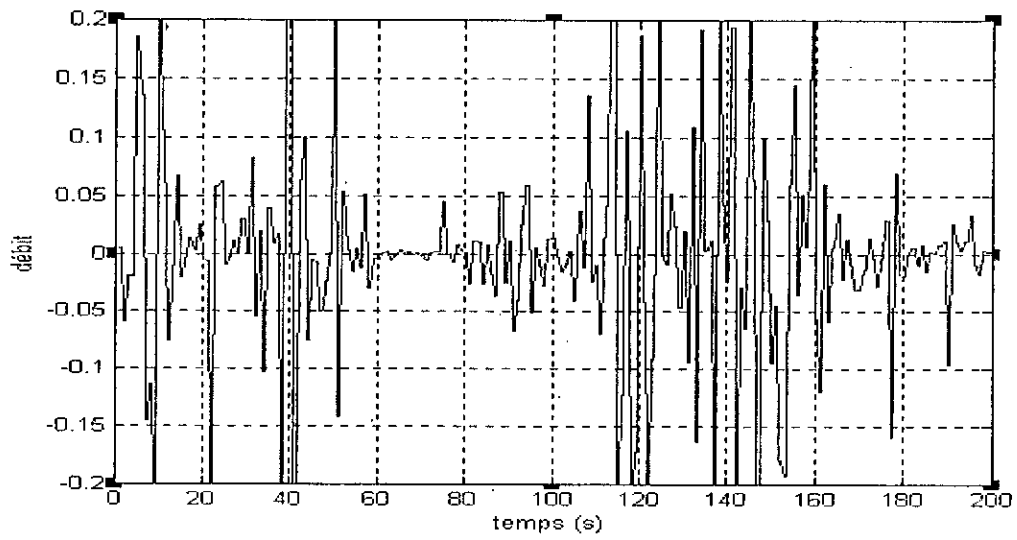


Figure IV-7b : Allure de la commande

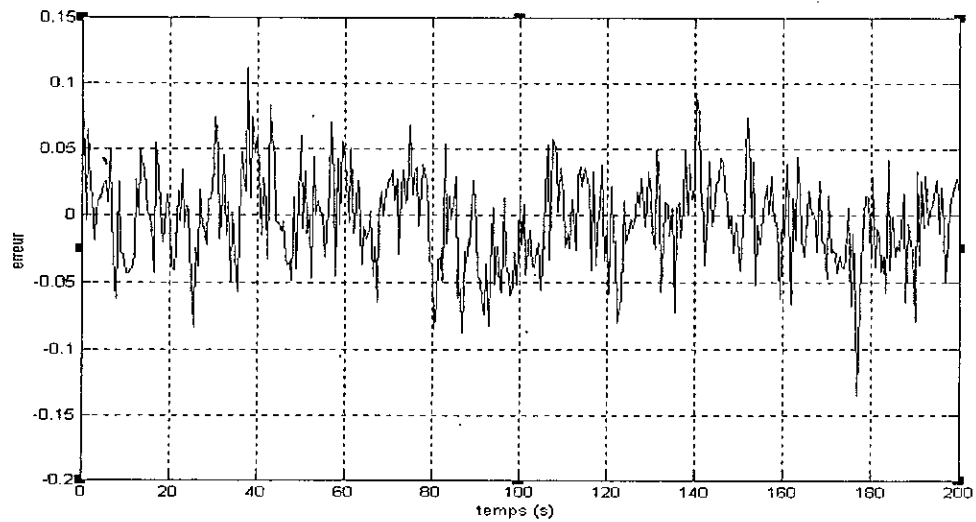


Figure IV-7c : Allure de la perturbation

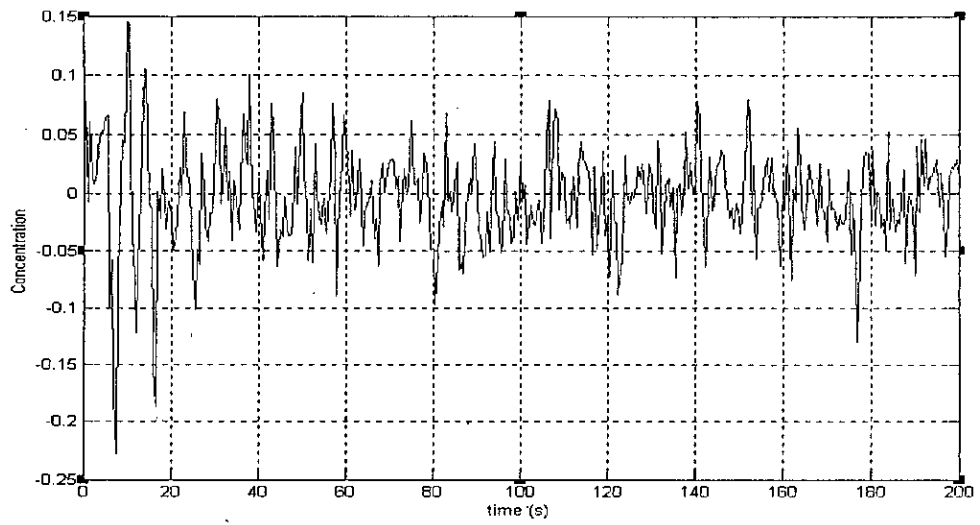


Figure IV-8a : Réponse de la sortie avec un polynôme d'estimation du 3<sup>ème</sup> ordre par la *Least Square Method*.

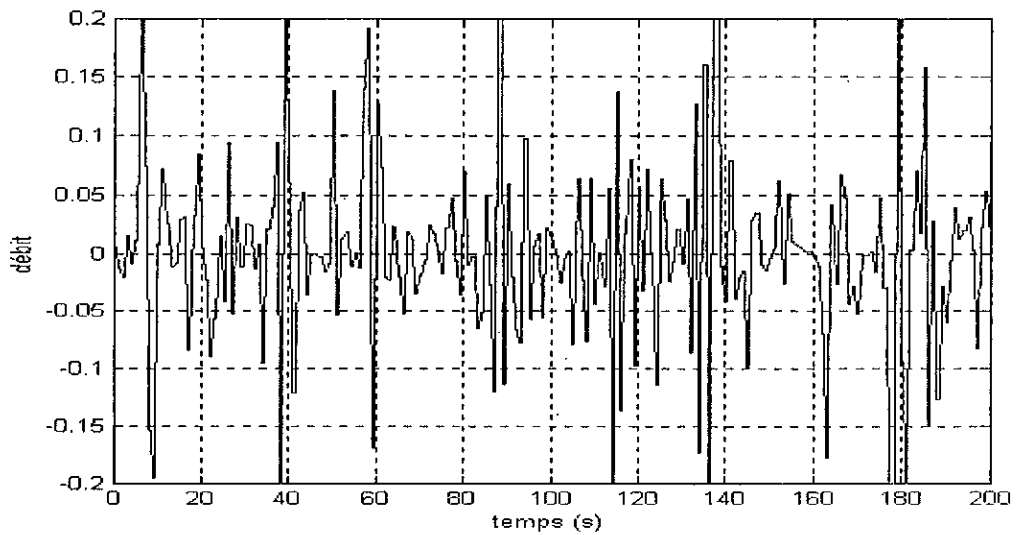


Figure IV-8b : Allure de la commande

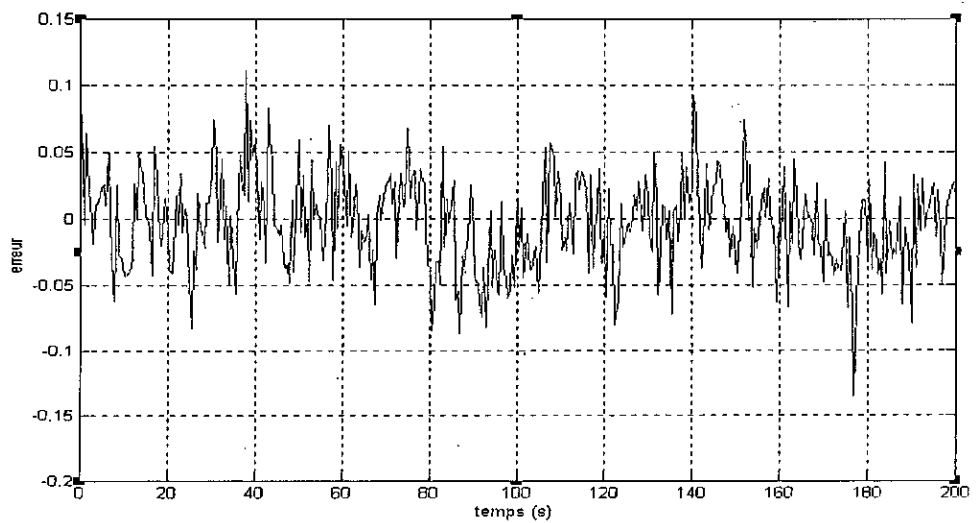


Figure IV-8c : Allure de la perturbation

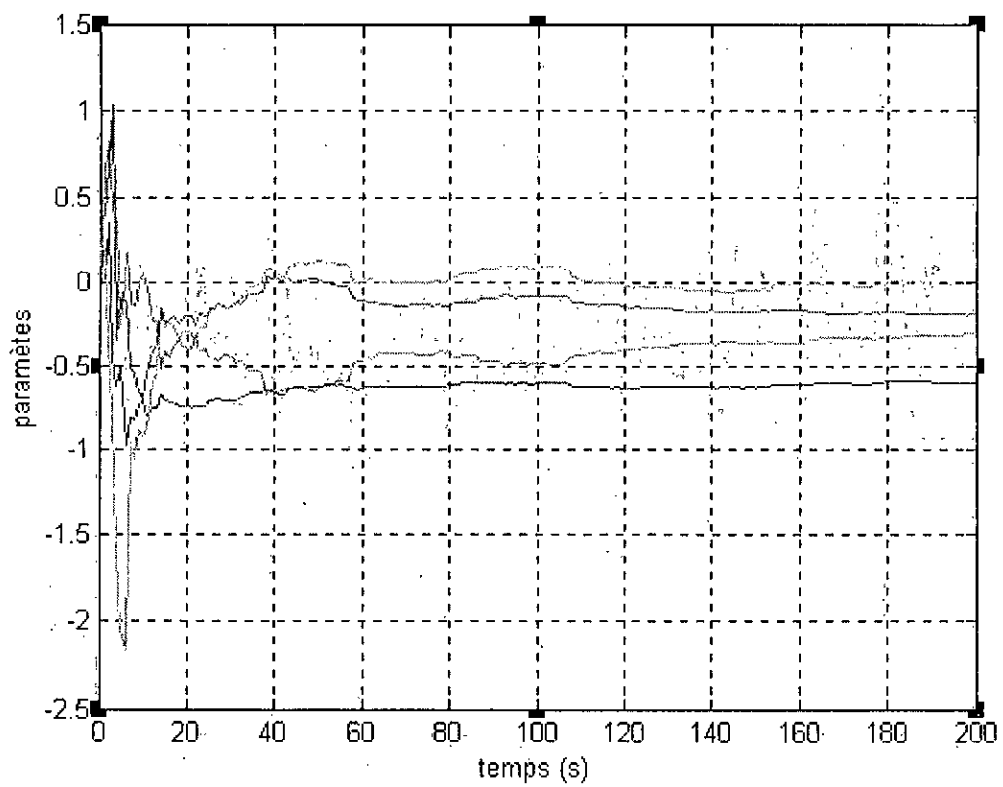


Figure IV-9 : Variations des paramètres de l'estimé du système (2<sup>ème</sup> ordre)

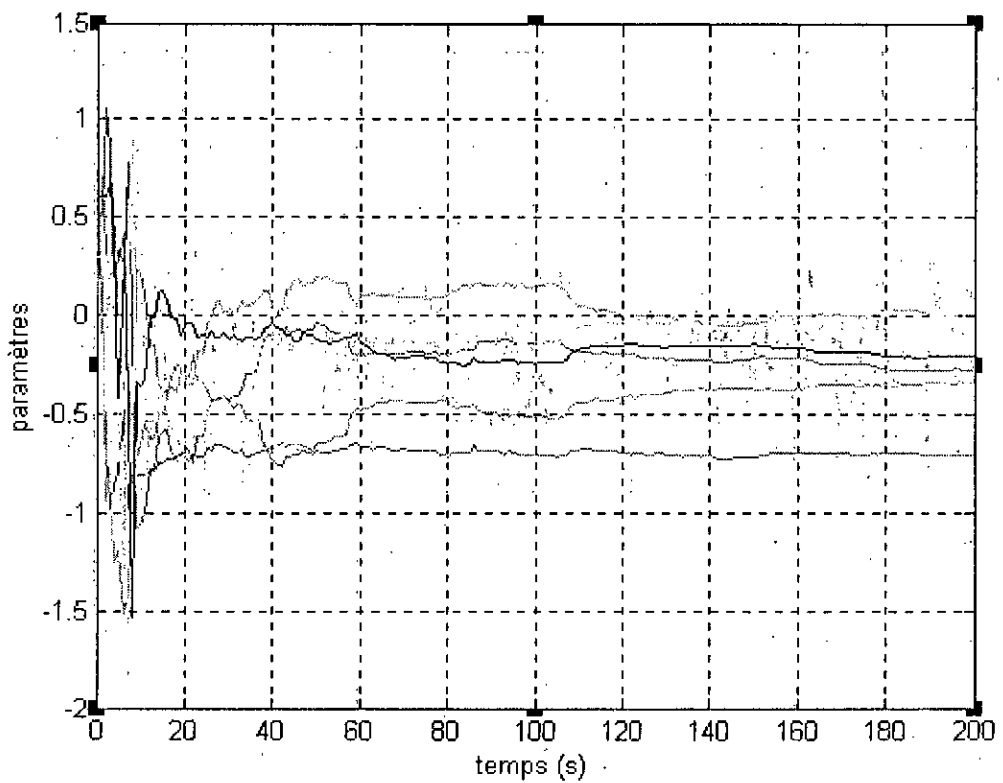


Figure IV-10 : Variations des paramètres de l'estimé du système (3<sup>ème</sup> ordre)

#### 4. Résultats et interprétation:

- La perturbation n'influence pas sur le système de façon qu'elle le fasse diverger et ce pour les deux stratégies de commandes (Figure IV-7a, Figure IV-8a), ce qui nous permet de dire que le régulateur est robuste vis-à-vis la perturbation .
- Une convergence rapide des paramètres est observée (Figure IV-9, Figure IV-10). Ce qui est attendu puisque nous avons adopté un modèle invariant dans le temps (3.4).
- La sortie du système deuxième ordre suit la référence avec une erreur qui dépasse, dans plusieurs occasions, 20% (Figure IV-7a). Dans le cas de la deuxième stratégie (modèle du troisième ordre) l'erreur n'atteint que rarement les 20%, en général elle est inférieure à 10%, (Figure IV-8a). En effet, une meilleure estimation du système est réalisée pour un ordre du modèle d'estimation plus grand et nécessairement un meilleur ajustage du régulateur est effectué par l'algorithme d'adaptation.
- L'application des versions d'algorithmes d'identification améliorées de la méthode des moindres carrés, à savoir : l'algorithme à *facteur d'oubli exponentiel* et à *facteur d'oubli directionnel adaptatif*, résulte en une diminution de l'erreur de sortie par rapport à la réponse obtenue pour le MCR (Figure IV-8a, Figure IV-11, Figure IV-12), ce qui confirme le rôle de l'estimé du modèle, en temps réel, dans la commande adaptative mais on doit faire attention au temps de calcul qui ne doit pas être comparable avec la période d'échantillonnage.

#### 5. Conclusion :

Différents aspects de la commande adaptative ont été étudiés, en partant d'un aperçu sur son historique et en finissant par l'implémentation dans le processus de l'absorption.

La comparaison entre les différentes stratégies et algorithmes utilisés nous permet de favoriser le régulateur à modèle de référence utilisant l'algorithme d'adaptation à *facteur d'oubli directionnel adaptatif* pour la commande de la colonne d'absorption.

## Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié, en détail, la colonne d'absorption en partant de sa modélisation mathématique et finissant par l'application de la commande adaptative sur cette colonne.

Nous avons analysé le mode de fonctionnement de la colonne, puis établi étape par étape son modèle mathématique à l'aide des principes fondamentaux concernant le transfert de matière, le modèle trouvé est non linéaire et sous forme d'une équation aux dérivées partielles du deuxième ordre.

Les diverses excitations auxquelles notre système a été soumis ont pu nous divulguer les différents aspects structurelles de notre système, à savoir : sa nature non-linéaire ; son temps de réponse  $t_r=3s$  ; la stabilité du système en boucle ouverte et l'influence de la perturbation et la commande sur le système.

Un bon estimé du modèle de la colonne d'absorption est obtenu pour des ordres importants (supérieur à trois).

La comparaison entre les différentes stratégies et algorithmes utilisés nous ont ramener à favoriser le régulateur à modèle de référence utilisant l'algorithme d'adaptation à *facteur d'oubli directionnel adaptatif* pour la commande de la colonne d'absorption.

Finalement, nous espérons que nous avons donné ce qui il faut à cette étude, et souhaitant que le lecteur prenne sa compréhension comme un essor pour l'amélioration et la réalisation pratique de ce travail.



## Annexe

### Nomenclature :

$A, B$	CO <sub>2</sub> , MEA
$R$	CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH
$G, L$	débit volumique de la phase gaz et liquide ( $m^3.s^{-1}$ )
$C_{Ag}, C_{Al}$	concentration du CO <sub>2</sub> dans la phase gazeuse et dans la phase liquide ( $mol.m^{-3}$ )
$C_{Bl}(x), C_{Al}(x)$	concentration de la MEA et de CO <sub>2</sub> dans le film liquide à une distance (x) de l'interface.
$C_{Al}, C_{Ag}$	concentration du CO <sub>2</sub> dans la phase liquide et dans la phase gazeuse à l'interface gaz-liquide ( $mol.m^{-3}$ )
$C_{ge}, C_{Be}$	concentration du CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> dans la phase gazeuse et de la MEA dans la phase liquide en sortie de la colonne
$C_{Bl}$	concentration de la MEA dans la phase liquide à l'interface gaz-liquide ( $mol.m^{-3}$ )
$D_g$	coefficient de dispersion axiale coté gaz ( $m^2.s^{-1}$ )
$S$	section de la colonne ( $m^2$ )
$\phi$	flux de CO <sub>2</sub> transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide ramené au volume de la phase liquide ( $mol.m^{-3}.s^{-1}$ )
$U_g, U_l$	vitesse d'écoulement du gaz et du liquide ( $m.s^{-1}$ )
$k$	constante de vitesse de réaction ( $m^3.mol^{-1}.s^{-1}$ )
$D_{Al}$	coefficient de diffusion du CO <sub>2</sub> dans la phase liquide ( $m^2.s^{-1}$ )
$a$	aire interfaciale par unité de volume du garnissage ( $m^2.m^{-3}$ )
$m$	pente de la droite d'équilibre physique entre phases.
$\varepsilon, \varepsilon_l, \varepsilon_g$	porosité de la colonne d'absorption, rétention liquide, rétention gazeuse.

## Références bibliographiques :

- [1] Document technique d'ingénieur, *Modélisation en génie des procédés*, J 1002 Enp.
- [2] A.Slatnia, *Communication au congrès sur les réacteurs polyphasiques*, Louvin, octobre 2002.
- [3] Lennart Ljung, *System Identification Theory for the User*, Prentice Hall PTR 1999
- [4] S.Aberkane, D.Baba ammi *Commande neuro-floue appliquée à une colonne d'absorption*, Pfe Enp 2002.
- [5] Zhongshan Wu *Simulation study and instability of adaptive control*, Master China, decembre 2001.
- [6] Rogelio Lozano, Damia Taoutaou, *Identification et commande adaptative*, Hermes 2001.
- [7] A.Bennebarek, B.Ghezali, *Commnde adaptative directe d'une colonne de distillation binaire*, Pfe Enp 1987.
- [8] Guy A. Dumonti, Mihai Huzmezan , *Concepts, methods and techniques in adaptive control*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, V6T 1Z4, Vancouver, B.C. Canada.
- [9] A.Naitseghir, A.Bouzida *Commande adaptative direct des systemes multivariables* Pfe Enp 1993.
- [10] S.Kherzat, A.Djeffal, *Contribution à la commande adaptative d'un bras manipulateur*,. Pfe Enp 1992.
- [11] Jean -Pierre Corriou, *Automatique et procédés chimique*, Hermes 2001.
- [12] J.-P.Wauquier, *Procédés de Séparation*, Edition technip, Paris 1998.
- [13] P.Leprince, *Procédés de transformation*, Edition technip, Paris 1998.
- [14] Kenneth W. Eure *Adaptive predictive Feedback Techniques for Vibration Control* PhD-Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999
- [15] A. Hocquengham P. Jaffard R.Chenon *Elements de calculs différentiels et intégrals* Masson, Tome II, Masson 1973
- [16] F. de Coulon, *Théorie et traitement des signaux*, Edition Dunod

- [17] Louis Maret, *Régulation automatique*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1987
- [18] Michael Hanké, René Lamour, *Consistent initialization for Non-linear index-2 Differential algebraic equation : Large Sparse systems in Matlab*, Parallel and scientific computing Institute, Report N°2001:5, October 22,2001
- [19] Levon Saldamli, *PDEModelica-Towards a high-level language for modeling with partial differential equations*, Linköping studies in science and technology, Linköping 2002
- [20] MathWorks, Matlab Help Desk 6.1
- [21] T. A. Hauge, R. Ergon, G. O. Forsland†, R. Slora‡and B. Lie, *Modeling, Simulation and Control of Paper Machine Quality*, Variables at Norske Skog Saugbrugs, Norway
- [22] David E. Keyes, *Terascale Optimal PDE Simulations (TOPS)*, Old Dominion University 2002
- [23] E. N. Houstis, J. R. Rice, S. Weerawarana, A. C. Catlin, P. Papachiou, K.-Y. Wang and M. Gaitatzes *A Problem Solving Environment for PDE Based Applications on Multicomputer Platforms*
- [24] Jorge Mari, Anders Aahlen†, and Anders Lindquist *a covariance extension approach to identification of time series*
- [25] S. Marsili-Libelli, M. Manzini *adaptive control for organic carbon dosing in denitrification*, Paper presented at WATERMATEX 2000, Gent (B), 18-20 Sept. 2000
- [26] Francesco Calugi, *Observer-Based Adaptive Control*, Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, April 2002
- [27] Michael B. McFarland and Anthony J. Calise, *Neural networks for stable adaptive control of air-to-air missiles*, School of Aerospace Engineering, Georgia
- [28] D.Pinglot, *Commande optimale et sous optimale d'un système hyperbolique non linéaire : colonne d'absorption*, doctorat d'état en automatique, Toulouse, 1984.
- [29] R.Vander Weg, *Modelisation et optimisation d'une colonne d'absorption*, Doctorat d'état en automatique, Toulouse, 1976.

ملخص:

في هذا العمل قمنا بمحاكاة و تطبيق التحكم التكيفي على أسطوانة امتصاص و التي تعتبر نظاما معقدا لاختيا. لهذه الأسطوانة تطبيقات عملية كبيرة اذ تستخرج غاز CO2 من مزيج غازي (هواء+CO2) عن طريق MEA. النتائج المحصل عليها خاصة من خلال المحاكاة كانت إيجابية و واعدة بتطبيقات ميدانية.

كلمات أساسية: أسطوانة امتصاص، MEA، CO2، محاكاة، التحكم التكيفي

Abstract :

In this work we simulated and implemented an adaptive controller on an absorption column wich is a very complicated and non-linear system. This column has a several industriel applications. It extract the CO2 gas from an (air+CO2) mixture using MEA. Results obtained, especially on simulation, are very interesting to be really realized.

Key words : Absorption column, MEA, CO2, simulation, adaptive control.

Résumé :

Dans ce travail nous avons simulé et appliqué la commande adaptative sur une colonne d'absorption qui se révèle un système compliqué et hautement non-linéaire. Cette colonne a plusieurs applications industrielles. Elle extrait le gaz CO2 d'un mélange (air+CO2) en utilisant la MEA. Les résultats obtenus ont été très intéressant et très prometteurs pour d'éventuelles applications réelles.

Mots clés : Colonne d'absorption, MEA, CO2, simulation, commande adaptative.