

5/91

Ex

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

COMMANDE NUMERIQUE

PAR

RETOUR D'ETAT

ADAPTATIF

Proposé par :

M.S. BOUCHERIT

Etudié par :

DJEMAI

Mohamed

Dirigé par :

M.S. BOUCHERIT

PROMOTION

juin 91

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فلكل من صلانا ونسكنا ومحبينا

ومماننا

لله رب العالمين

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

**COMMANDE NUMERIQUE  
PAR  
RETOUR D'ETAT ADAPTATIF**

\*\*\*\*\*  
\* REMERCIEMENTS. \*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

Mes remerciements vont à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie en particulier monsieur BOUCHERIT M.Sghir en tant que promoteur.

J'exprime ma profonde reconnaissance à monsieur BOUDJEMAÂ Farès et monsieur ILOUL Rachid pour les commentaires et remarques précieux qu'ils m'ont fait et pour avoir examiner mon travail.

Tous mes remerciements s'adressent à messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'il m'ont fait en acceptant de sieger dans ce jury.

Que monsieur STIHI Omar trouve ici l'expression de mes profonds sentiments pour sa sollicitude et son aide technique qu'il m'a fait bénéficier.

J'associe dans une même pensée reconnaissante toute la l'équipe de la bibliothèque et du centre de calcul.

Je désire exprimer vivement ma reconnaissance et mes remerciements à toute la promotion d'automatique et celle d'électrotechnique et tous ceux avec qui j'ai pu établir des relation d'amitié durant mes cinq années d'étude à l'E.N.P.

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة  
BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

A mes parents,

A toute ma famille,

A amine et soumaia,

A mes amis et amies,

A mes enseignants.

Je dedie ce travail.

## SOMMAIRE

	Page
SOMMAIRE.....	I
LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS.....	III
INTRODUCTION.....	IV
CHAPITRE I :           GENERALITES.....	1
I.1 : Introduction.....	2
I.2 : Quelques aspects de la commande adaptative.....	2
I.3 : Commande adaptative et commande à contre réaction conventionnelle.....	4
I.4 : Techniques de commande adaptative.....	5
I.4.1 : Commande adaptative en boucle ouverte..	6
I.4.2 : Commande adaptative en boucle fermée... 7	
I.4.2.a : Commande adaptative à modèle de référence.....	8
I.4.2.b : Commande autoadaptative.....	9
I.5 : Conclusion.....	10
CHAPITRE II :       COMANDE DES PROCESSUS DANS L'ESPACE D'ETAT.....	11
II.1 : Introduction.....	12
II.2 : Représentation du procédé .....	13
II.3 : Loi de commande .....	15
II.4 : Structure optimale du réglage d'état.....	16
II.5 : Conclusion.....	18
CHAPITRE III :     COMMANDE ADAPTATIVE EN BOUCLE OUVERTE....	19
III.1 : Introduction.....	20
III.2 : Réglage d'état.....	20
III.2.1: Détermination de la contre réaction d'état.....	21

III.2.2: Détermination de l'intervention de la consigne.....	22
III.2.3: Détermination de l'intervention de la perturbation.....	23
III.3 : Réglage d'état adaptatif en boucle ouverte...	24
III.3.1: Structure du réglage d'état adaptatif en boucle ouverte.....	24
III.3.2: Prédétermination des coefficients de réglage.....	25
III.4 : Conclusion.....	26
<b>CHAPITRE IV : COMMANDE ADAPTATIVE EN BOUCLE FERMEE.....</b>	<b>27</b>
IV.1 : Introduction.....	28
IV.1 : Methode de SAMSON.....	28
IV.2 : Methode de HARRIS & BILLINGS.....	31
IV.3 : Réglage d'état adaptatif en boucle fermée.....	32
IV.3.1: Structure de réglage d'état adaptatif en boucle fermée.....	33
IV.3.2: Calcul récursif des coefficients de réglage.....	34
<b>CHAPITRE V : APPLICATION.....</b>	<b>36</b>
V.1 : Introduction.....	37
V.2 : Présentation du procédé.....	37
V.3 : Adaptation en boucle ouverte.....	39
V.4 : Adaptation en boucle fermée.....	39
V.5 : Présentation des résultats.....	40
V.6 : Conclusion.....	42
<b>CONCLUSIONS &amp; PERSPECTIVES.....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>60</b>

**Liste des principales notations :**

- $k$  : Temps discret normalisé.  
 $u(k)$  : Grandeur d'entrée de commande du système à commander.  
 $y(k)$  : Grandeur de sortie du système à commander.  
 $x_s(k)$  : Grandeur d'état du système à commander.  
 $x_r(k)$  : Grandeur d'état du régulateur intégrateur.  
 $x(k)$  : Vecteur d'état global.  
 $w(k)$  : Grandeur de consigne.  
 $v(k)$  : Grandeur de perturbation.  
 $F_s$  : Matrice d'état du système à commander ( $n_s, n_s$ ).  
 $h_s$  : Vecteur d'entrée ( $n_s$ ).  
 $h_{sv}$  : Vecteur d'entrée liant la perturbation au système à commander ( $n_s$ ).  
 $a_i$  : Eléments de la matrice  $F_s$ .  
 $b_i$  : Elément du vecteur  $h_s$ .  
 $\theta(k)$  : Vecteur paramètres.  
 $c_s$  : Vecteur de sortie ( $n_s$ ).  
 $n_s$  : Ordre du système à commander.  
 $n$  : Ordre du système global (système à commander avec régulateur).  
 $F$  : Matrice d'état global ( $n, n$ ).  
 $h$  : Vecteur d'entrée du système global ( $n$ ).  
 $h_v$  : Vecteur d'entrée liant le système global à la perturbation ( $n$ ).  
 $h_w$  : Vecteur d'entrée liant le système global à la consigne.  
 $c$  : Vecteur de sortie global ( $n$ ).  
 $k_s^T$  : Vecteur ligne de la contre réaction.  
 $k_r$  : Coefficient d'intervention du régulateur.  
 $k^T$  : Vecteur ligne de retour d'état global.  
 $k_w$  : Coefficient d'intervention de la Grandeur de consigne.  
 $k_v$  : Coefficient d'intervention de la Grandeur de perturbation.

## **INTRODUCTION**

## Introduction

Depuis le debut des années cinquante, on note une activité toujours croissante dans le domaine de l'étude de la commande adaptative. La motivation principale de cette activité a été d'apporter une solution au contrôle des procédés, à paramètres variables dans le temps. En effet, dans plusieurs situations, le comportement dynamique du système à régler, est partiellement ou totalement inconnu. Les méthodes classiques de commande aboutissent parfois à de faibles performances en boucle fermée et à une détérioration de la robustesse du régulateur. surtout que le dimensionnement robuste du régulateur ne donne plus de résultats satisfaisants, lorsque les paramètres du système à commander varient dans le temps [5].

Il faut ajouter à cela, que l'hypothèse d'invariance (stationnarité), pour les systèmes de commande, est le plus souvent inadéquate: les procédés industriels évoluent dans le temps, les points de fonctionnement se déplacent, les valeurs des paramètres changent. En plus, quelque systèmes présentent une certaine complexité pour la commande comme par exemple les systèmes à paramètres répartis tel que les échangeur thermiques.

Plusieurs techniques ont été proposées dans le domaine de la commande adaptative. La plupart étaient basées sur la modélisation linéaire des procédés à régler. Ceci pour des raisons de facilité de traitement, le cas d'un modèle linéaire, présente en plus l'avantage de se situer dans un contexte théorique très riche. Il débouche d'autre part sur de très nombreuses applications, la majorité des systèmes étant linearisables autour d'un point de fonctionnement [6].

La théorie moderne des systèmes linéaire, fait appel à la notion des variables d'états, avec lesquelles le comportement d'un système peut être entièrement décrit. Cette théorie se prête bien au traitement des systèmes continus et échantillonnés.

L'utilisation de cette représentation pour les systèmes échantillonnés, a conduit au développement de plusieurs techniques numériques. Ces derniers, ont permis l'utilisation pratique des algorithmes complexes de la commande adaptative. Il faut noter aussi, que la complexité des algorithmes développés dans la théorie, constituait un inconvénient majeur pour la mise en évidence de la commande adaptative. On pourrait penser que cet inconvénient est rendu mineur grâce à l'utilisation des calculateurs numériques, cela a joué non seulement sur le temps de calcul (facteur très important en temps réel) mais surtout sur la précision et qualité des résultats.

### Présentation du mémoire :

L'idée génératrice de ce mémoire, a été de présenter une méthode pour mettre en évidence la commande adaptative dans l'espace d'état. Ce mémoire contient cinq chapitres :

Le premier chapitre est une introduction générale à la commande adaptative. Nous présenterons sa définition générale, nous donnerons ensuite quelques aspects de cette commande. Enfin, nous présenterons une synthèse des techniques de commande adaptative. Dans le cas de la boucle ouverte, nous présenterons la méthode d'adaptation à gain programmé, qui constitue un exemple très pratique, de plus en plus utilisé. Dans le cas de commande adaptative en boucle fermée, nous examinerons deux cas possibles :

- Commande directe ou nous allons présenter comme exemple le cas de la poursuite de modèle de référence.
- Commande indirecte ou nous allons présenter comme exemple le cas de la commande auto-adaptative.

Le second chapitre, sert comme introduction à la commande dans l'espace d'état, ou nous présenterons la modélisation du système à commander. Nous donnerons ensuite l'objectif de la commande. Enfin, nous présenterons la structure optimale du réglage dans l'espace'état.

Le chapitre trois contient deux parties. Nous présenterons,

dans la première partie un algorithme de réglage des systèmes stationnaires, ou nous donnerons les principes adoptés pour la détermination des coefficients de réglage, basés sur le principe de placement de pôles en boucle fermée.

Dans la seconde partie, le bloc d'adaptation fera l'objet de notre intervention. Ceci dans le but de réaliser une commande adaptative en boucle ouverte, à partir du réglage d'état présenté dans la première partie.

Le chapitre quatre contient lui aussi deux parties. La première est consacré à présenter deux méthodes de commande adaptatives en boucle fermée, méthode de SAMSON (1982) et HARRIS & BILLINGS (1985). Les deux sont basées sur le principe de minimisation d'un critère quadratique.

Dans la deuxième partie, on se basant sur le même principe, on présentera une méthode de réglage se basant sur la structure de réglage d'état présenté à la section ( §.II.4 ), où nous intervenons pour réaliser le bloc d'adaptation.

C'est toujours le bloc d'adaptation qui fera l'objet de notre intervention.

Dans le chapitre cinq, nous essayerons de faire quelques applications sur les deux algorithmes qui ont fait l'objet d'une programmation en TURBO PASCAL. Nous présenterons quelques essais sur les cas qui sont les plus rencontrés dans la pratique.

A la fin de ce mémoire, nous tirerons quelques conclusions générales sur la commande adaptative et son application, nous donnerons ensuite les perspectives de notre travail.

**Chapitre I**

**GENERALITES**

## I.1 : INTRODUCTION :

Bien qu'il soit difficile de donner une définition précise de l'adaptation en automatique, le sens généralement retenu consiste à dire qu'un régulateur est dit adaptatif, s'il peut modifier son comportement en réponse à des changements dans la dynamique du procédé à contrôler ou à des perturbations [5].

Cette modification doit naturellement se faire d'une manière automatique, sans intervention externe. Quant au comportement du régulateur, il est défini par son aptitude à maintenir un certain niveau de performance, préalablement choisit par l'utilisateur.

La commande adaptative connaît un très grand développement, les raisons principales sont [13]:

- a - Les études théoriques ont conduit au développement d'algorithmes de commande adaptative performants et à de nouvelles méthodes d'analyse.
- b - Les applications, déjà réalisées, ont prouvé l'intérêt et la validité de cette commande.
- c - Les possibilités de calcul offertes par les mini et micro ordinateurs élargissent de jour en jour le champ d'application de la commande adaptative.

Dans ce chapitre, nous allons donner les aspects généraux de la commande adaptative. Ensuite, on présentera les techniques et schémas de trois méthodes principales pour la mise en œuvre de cette commande.

## I.2 : QUELQUES ASPECTS DE LA COMMANDE ADAPTATIVE :

C'est au début des années 70 qu'ont été réellement faites les premières applications industrielles de régulations automatiques auto-adaptatives. Mais il a fallu attendre les années 80 pour que les techniques adaptatives modernes aient un véritable impact sur le monde industriel. La règle générale qui

était retenu jusqu'à présent, dans le domaine industriel, était l'utilisation des régulateurs PID ([2],[3],[5]) à paramètre ajustables ou pas. En effet, la reconnaissance d'un tel régulateur dans le domaine industriel est unanime, du fait de sa simplicité et de sa robustesse, même si ces performances sont parfois insuffisantes.

Il est nécessaire, pour entreprendre la commande d'un système physique de façon adaptative, de suivre certaines règles qui permettent de mieux définir les objectifs et les moyens pour les atteindre. Les objectifs recherchés peuvent être de plusieurs natures :

- Maximisation de production,
- Amélioration de productibilité,
- Minimisation de dépense en énergie,
- Espacement des arrêts d'entretien,

ou même par fois, un compromis entre plusieurs objectifs.

Les méthodes adaptatives ont fait d'abord l'objet d'étude de faisabilité, pour évaluer leur utilité suivant l'application. Les principaux domaines d'intérêts ont été [5] [12] [13] :

- Les pilotages automatiques,
- Les robots industriels,
- Les réacteurs chimiques,
- Les fours de cimenteries,
- Les échangeurs de chaleurs,
- Les machines outils,.....

Ces études ont confirmé l'idée que la commande adaptative pouvait améliorer les résultats existants.

Les Tâches qui doivent être effectuées lors d'une commande adaptative sont :

- L'ajustement automatique des régulateurs et détermination de leurs paramètres optimaux .
- Maintien des performances du système évoluant dans le temps.
- Possibilité de mise en oeuvre des régulateurs plus

complexes que les regulateurs classiques.

A tout cela, il faut ajouter que dans le domaine industriel en général, on ne fait appel à la commande adaptative que quand c'est techniquement nécessaire et économiquement rentable.

### I.3 : COMMANDE À CONTRE REACTION ET COMMANDE ADAPTATIVE.

Initialement, la contre-reaction a été introduite pour reduire l'effet des perturbations agissant sur les variables à regler. Mais on s'est rendu compte qu'elle ne peut pas prendre en considération le type de perturbations parametriques, agissant sur les performances du système de commande . c'est à ce niveau qu'intervient la commande adaptative.

Le principe général d'un système de commande adaptative est representé dans la Figure I-1. On retrouve une boucle classique à contre réaction, comportant le procédé et le regulateur à paramètres ajustables. La second boucle permet d'adapter en temps réel les paramètres du régulateurs en fonction d'un certain Indice de performance (I.P).

L'(I.P) est défini par l'utilisateur lors de la concéption de la boucle de controle, et peut prendre plusieurs formes (facteurs d'amortissement, constante de temps), pour être ensuite comparer à l'(I.P) désiré . Ainsi C'est le bloc d'adaptation qui gère l'erreure calculée, pour pouvoir agir sur les paramètres du régulateur, et aini maintenir l'(I.P) autour de la valeur desirée.

#### Definition :

Landau [13] à présenter la definition suivante:

Un système de commande adaptative, mesure un certain indice de perfomance (I.P) du système de commande . A partir de l'écart entre l'(I.P) mesuré et l'(I.P) desiré, le mecanisme d'adaptation modifie les parametres de regulateurs ajustables ou les signaux de commande, afin de maintenir ouu ameliorer les performances.

Un système à contre-réaction conventionnelle réduit l'effet de perturbations agissant sur les variables à régler . Par contre, les performances dynamique varient sous l'effet des perturbations paramétriques.

Un système de commande adaptative contient en plus d'une boucle à contre réaction ayant un régulateur à paramètres ajustables, une boucle supplémentaire qui agit sur les paramètres du régulateur cette boucle à aussi structure de contre-réaction.

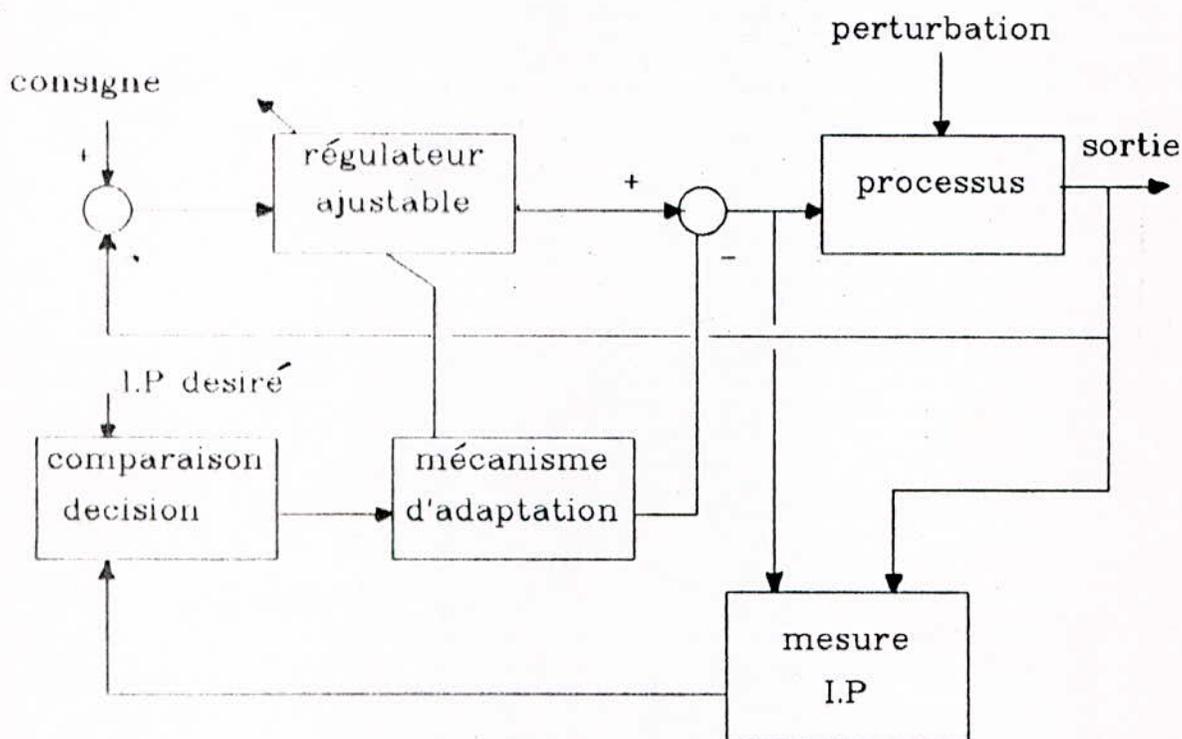


Figure I.1 : Principe général d'un système de commande adaptative.

#### I.4 TECHNIQUES DE COMMANDE ADAPTATIVE

Le principe général d'un système de commande adaptative présenté dans la Figure I.1, peut prendre plusieurs formes, selon les choix faits pour les différents blocs qui le composent.

#### 1.4.1 Commande adaptative en boucle ouverte :

Les premières tentatives d'implémentation des lois de commande adaptative ont été faites en boucle ouverte. la commande à gain programmé est un exemple célèbre de commande en B.O, Dans ce cas il n'y a pas de comparaison entre l'(I.P) mesuré et l'(I.P) désiré. l'adaptation se fait alors en fonction des variables auxiliaires, issues de l'environnement opératoire (Fig I.2). Le bloc d'adaptation contient une table de gain disponibles ou des relations rigide qui relie les variables de l'environnement et les paramètres du procédé. La lecture dans la table associée aux mesures de l'environnement permet la détermination des coefficients de réglage, afin de réaliser les performances désirées.

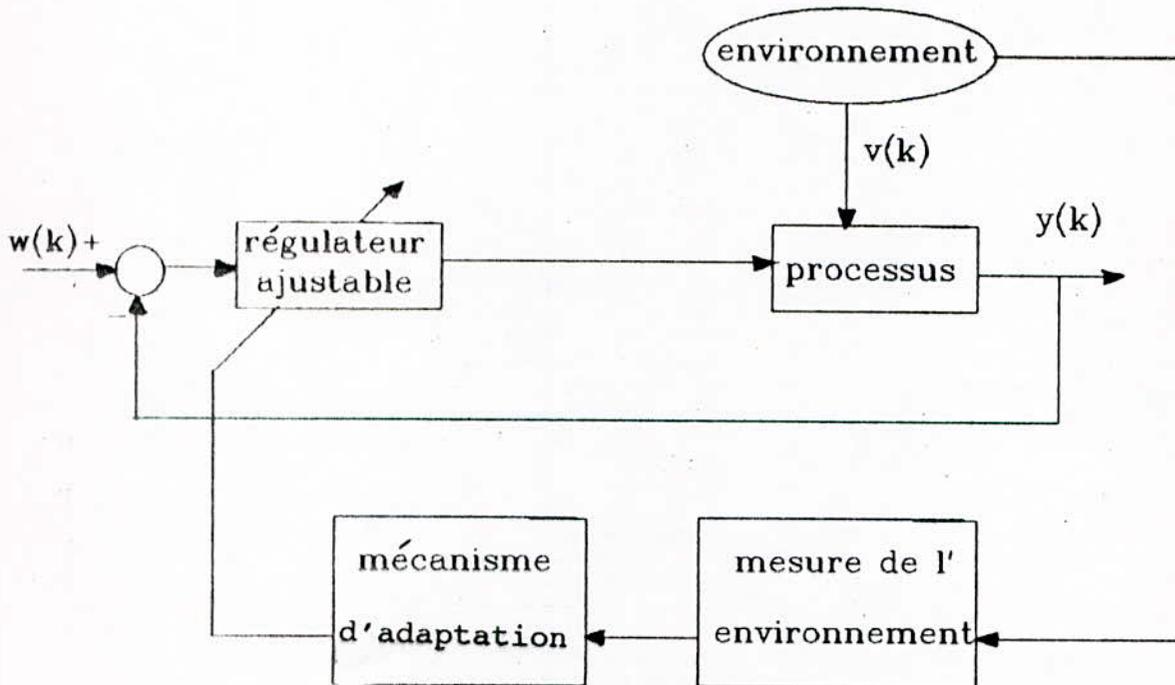


Figure I.2 : Commande adaptative en boucle ouverte

Ce type de contrôle ne permet pas de diminuer totalement l'effet de perturbations paramétriques, mais garantit à tout de même une adaptation par rapport aux variables auxiliaires . Les résultats de la commande peuvent être bons, dans le cas où les performances sont suffisamment reliées aux caractéristiques dynamiques du procédé, mais les performances de la commande se détériorent rapidement si ces relations changent au cours du temps.

Un autre problème réside dans le fait que l'élevation de ces variables auxiliaires peut nécessiter des capteurs additionnels. De plus, l'opérateur doit souvent spécifier le contenu du bloc d'adaptation (table de gain, ou fonctions qui relient le système aux variables auxiliaires), ce travail peut être long et fastidieux, car nécessitant de nombreuses expériences .

#### 1.4.2 : Commande adaptative en boucle fermée :

La majeure partie des études théoriques a été développée à partir des schémas de commande adaptative en boucle fermée. Deux approches se présentent :

- L'approche directe (implicite)
- L'approche indirecte (explicite).

Dans le premier cas, les paramètres du régulateur sont directement ajustés des mesures d'erreur de performances. Dans le second cas, l'adaptation des paramètres se fait en deux étapes :

- Les paramètres du procédé sont estimés dans la première étape.
- Les paramètres du régulateur sont ensuite calculés à partir de ces estimations, dans la seconde.

L'approche indirecte nécessite évidemment un volume de calcul plus important, mais son domaine d'application est beaucoup plus large. Ainsi elle a fait l'objet de davantage de recherches que l'approche directe, donc plus investie. Cette dernière est limitée à quelques applications spécifiques, du fait de la rigidité des propriétés que doivent satisfaire les modèles des procédés. Nous allons présenter deux schémas de commande adaptatives, l'un

directe: c'est la commande adaptative à modèle de référence, l'autre indirecte: c'est la commande auto-adaptative [13].

### I.3.2 a : Commande adaptative à modèle référence :

Cette methode à été proposé par WHITAKER (1958), c'est une commande directe. Elle est basée sur la realisation de la foction de transfert du modèle de reference (desiré): Les paramètres du regulateur sont directement ajustés en fonction des informations qui sont données en termes de comportement attendu de la sortie du système en réponse à un changement de consigne .

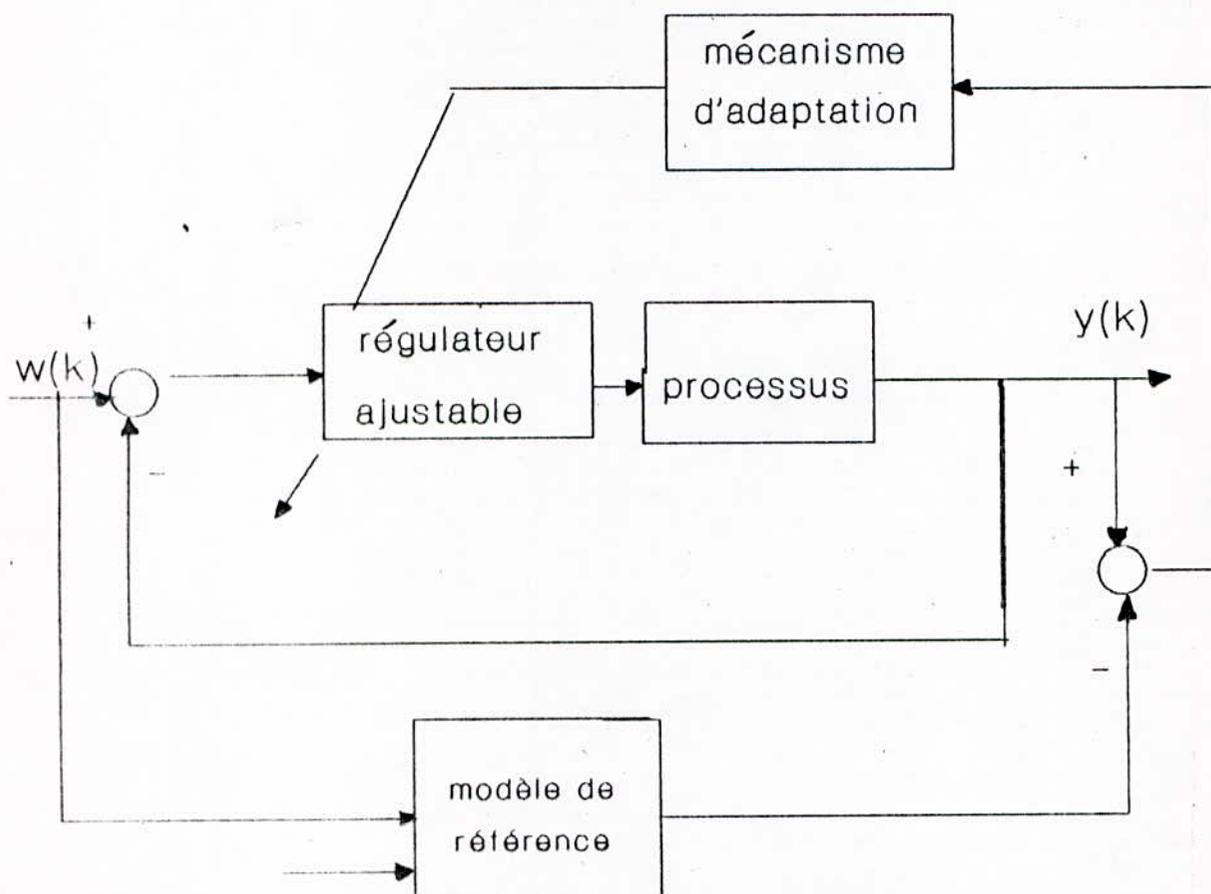


Figure I.3 : Commande adaptative à modèle de référence.

L'indice de performance mesuré est ici la sortie du procédé, l'indice de performane desiré est la sortie de modèle de

référence, et l'adaptation se fait en fonction de l'erreur de sortie et de l'historique des entrées-sorties.

### I.3.2 b : Commande auto-adaptative:

La commande auto-adaptative (self-tuning control), est de type indirecte indirecte (Figure.I.4) Elle a été proposée par KALMAN (1958) Ce schéma est couramment utilisé lorsque les caractéristiques du procédé sont inconnues, et varient éventuellement avec le temps et avec les conditions opératoires.

Le modèle du procédé intervenant dans le calcul de la commande est estimé en temps réel, et les paramètres du contrôleur sont calculés à partir de ce modèle.

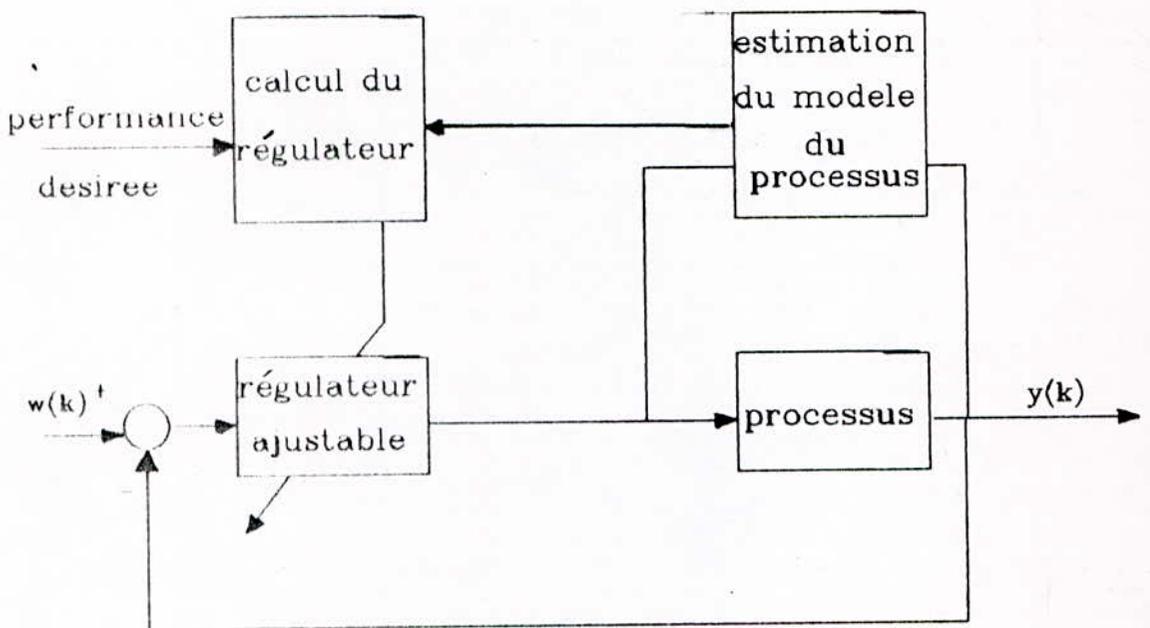


Figure I.4 : Commande auto-adaptative.

## Conclusion:

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'aspect général de la commande adaptative. La figure I.1 présente le schéma de base de la commande adaptative, et c'est le bloc d'adaptation qui permet de réaliser un type donné de commande. Dans le chapitre trois et quatre, nous présenterons deux type de commande qui utilisent comme champ de travail l'espace d'état.

Nous présenterons la structure générale d'un réglage d'état avec un bloc d'adaptation qui détermine le type de commande.

**Chapitre II**

**COMMANDE DES PROCESSUS**

**DANS L'ESPACE D'ETAT**

## II.1 : INTRODUCTION

Le réglage d'état, adaptatif ou non, constitue une méthode de réglage moderne, la plupart des systèmes de commande modernes utilisent l'espace d'état comme un champ de travail. Ces techniques commencent à s'introduire dans le domaine industriel. En effet, dans beaucoup de cas, on obtient une qualité de réglage meilleure par rapport à celle du réglage classique. Ce chapitre sert comme introduction pour ce qui suit, on présentera deux méthodes de réglage adaptatif dans l'espace d'état.

On établira dans ce chapitre, les relations de base pour le système à régler. On présentera dans ce but les équations en boucle ouverte et en boucle fermée. On partira donc d'un cas particulier, mais très fréquent, où le système est mono entrée-mono sortie linéaire. La structure de réglage, donnée par une contre réaction d'état, devient dans ce cas là assez transparente.

Plusieurs manières de réflexion permettent de mettre en évidence les propriétés essentielles de la contre réaction d'état, en particulier la modification du comportement dynamique du système à régler, amélioration de ces performances et assure sa stabilité en boucle fermée. Elle sera ensuite complétée par un régulateur intégrateur, qui a pour but d'éliminer l'erreur en régime établi, pour enfin aboutir aux relations générales du réglage d'état qui seront présentées à la section (§ II.1).

Enfin, comme on ne peut faire appel au réglage d'état, que si le système à régler est commandable, on suppose que notre système l'est. Cette condition est nécessaire. On considère aussi que ce système est observable, (les grandeurs d'états sont accessibles). La vérification de la commandabilité et l'observabilité du système peut être assurée par des algorithmes adéquats. Pour plus de détails nous renvoyons le lecteur aux ouvrages [7], [10].

## II.2: REPRESENTATION DU PROCÉDE :

La modélisation d'un procédé à régler, constitue la première étape dans l'élaboration d'un algorithme de réglage. Le modèle doit être capable de représenter les différentes dynamiques présentes, tout en ayant une structure compatible avec le calcul de la loi de commande. Le système à réglé choisi est basé sur un modèle paramétrique linéaire perturbé, donné par l'équation différentielle:

$$y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \dots + a_1 y = b_n u^n + \dots + b_1 u^1 + b_0 u + v \quad (2.1)$$

Les procédés réels étant par nature non linéaires, le modèle ci dessus décrit le comportement externe du processus dans une zone plus ou moins large autour d'un point de fonctionnement. L'utilisation d'un modèle linéaire conduit donc à des erreurs de modélisations. Cependant on fait l'hypothèse que cette représentation se rapproche le plus possible à la réalité. Pour les raisons citées dans l'introduction générale nous adoptons donc la représentation dans l'espace d'état, le passage à cette représentation donne les équations d'états suivantes, pour un système continu: [7],[10]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_s x(t) + b_s u(t) + b_{sv} v(t) \\ y(t) &= c_s^T x(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

L'échantillonnage du procédé continu (2.3) donne le système d'équations échantillonnées :

$$\begin{aligned} x_s(k+1) &= F_s x(k) + h_s u(k) + h_{sv} v(k) \\ y(k) &= c_s^T x(k) \end{aligned} \quad (2.3)$$

En effet, le fait que la commande adaptative moderne se fasse de plus en plus à l'aide des calculateurs numérique, et pour tirer réellement d'avantage de l'utilisation des micro et mini ordinateurs dans les boucles de régulation, il faut changer de langage en remplaçant les modèles continus par des modèles échantillonnés, les régulateurs continus par des algorithmes de réglage numériques.

La Figure II.1 chématise une boucle de régulation avec calculateur numérique. L'ensemble C.N/A - procédé - C.A/N est interprété comme un procédé discret, dont l'entrée de commande est la séquence  $\{u(k)\}$  engendrée par le calculateur, la sortie étant la séquence  $\{y(k)\}$  résultant de la conversion A/N de la sortie du procédé.

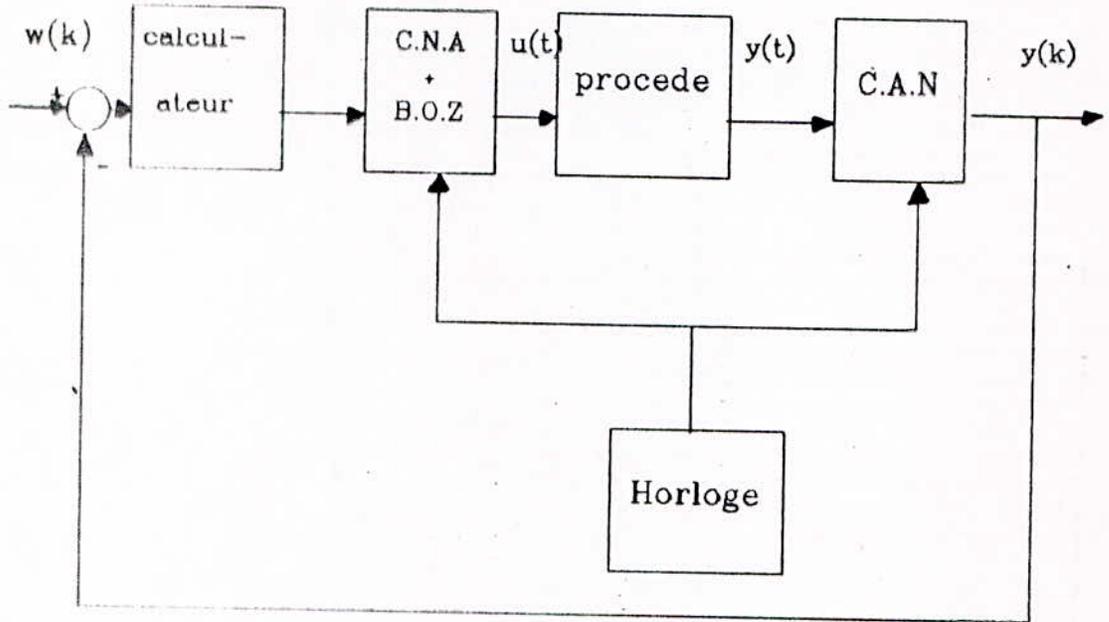


Figure II.1: Commande par calculateur numérique.

Il est parfois nécessaire d'introduire un régulateur intégrateur dans la boucle de réglage. L'introduction de celui-ci conduit aux équations global suivantes:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F} \mathbf{x}(k) + \mathbf{h} u(k) + \mathbf{h}_v v(k) + \mathbf{h}_w w(k) \\ y(k) &= \mathbf{C}^T \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

avec:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} F_s & 0 \\ -C_s^T & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{h} &= \begin{bmatrix} h_s \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{h}_v &= \begin{bmatrix} h_{sv} \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{h}_w &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}^T &= \begin{bmatrix} C_s^T & 0 \end{bmatrix} & \text{ou} & \mathbf{x}(k) &= \begin{pmatrix} x_s(k) \\ x_r(k) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.5)$$

### II.3 : LOI DE COMMANDE:

L'objectif de la commande est de chercher un retour d'état, qui permet d'avoir une trajectoire donnée de la sortie du procédé à commander ou d'améliorer ces performances. La minimisation d'un critère quadratique par rapport à la grandeur de commande, est un moyen très pratique pour calculer le retour d'état nécessaire. Un autre moyen qui permet de calculer ce retour d'état est d'utiliser le principe de placement de pôles.

Notre travail consiste à mettre en évidence les objectifs de cette commande. Deux possibilités se présente pour déterminer le retour d'état.

- Placement de pôles.
- Minimisation d'un critère quadratique.

Le principe de placement de pôles ou imposition de pôle, impose une certaine dynamique, pour le système à commander, en boucle fermée. Cela nous permet d'avoir les performances exigées (le choix de ces pôles est fait de façon à assure une réponse)

La minimisation d'un critère permet de déterminer les le retour d'état et donc la loi de commande optimale. On peut à partir de ces résultats tirer la structure de réglage optimale. La minimisation d'un critère quadratique permet d'exprimer de manière convenable les qualités recherchés par la commande, afin d'assurer le meilleur compromis entre les performances présentés par des termes de pondération. Par contre, souvent l'influence de ces coefficients sur le comportement dynamique n'est pas clair a priori. En effet, le comportement transitoir du système global dépend fortement leur choix.

Dans les chapitres qui suivent nous considérons le critère quadratique présenté par BUHLER [7]:

$$J = q_e e_n(k) + \sum_{k=0}^{N-1} \{ q_e e(k) + r_x u^2(k) \} \quad (2.6)$$

ce critère peut être écrit de la forme:

$$\begin{aligned}
 J &= x_n^T \cdot Q \cdot x_n - 2 \cdot w_n^T \cdot q_o \cdot C \cdot x_n + w_n^T \cdot q_o \cdot w_n \\
 &+ \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T \cdot Q \cdot x_k - 2 \cdot w_k^T \cdot q_o \cdot C \cdot x_k + w_k^T \cdot q_o \cdot w_k + r_x \cdot u^2)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

La loi de commande  $u(k)$  présentée dans l'espace d'état, est donnée par la formule:

$$u(k) = -u_c(k) + u_w(k) - u_v(k)$$

ou les trois composantes sont données par:

$$u_c(k) = k_o^T x_o(k) - k_r x_r(k)$$

$$u_w(k) = k_w w(k)$$

$$u_v(k) = k_v v(k)$$

Le vecteur ligne  $k_o^T$  ainsi que les coefficients  $k_r$ ,  $k_w$  et  $k_v$  sont à déterminer afin que les états prennent un comportement prédéterminé du système global en boucle fermée donné par les équations d'états suivantes:

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= F_g x(k) + h_{gw} w(k) + h_{gv} v(k) \\
 y(k) &= c x(k)
 \end{aligned}$$

avec:

$$\begin{aligned}
 F_g &= F - h \cdot k^T \\
 h_{gw} &= h_w + h \cdot k_w \\
 h_{gv} &= h_v - h \cdot k_v
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

et :

$$k^T = k_o^T \quad -k_r \tag{2.12}$$

ce vecteur ligne contient  $n = n_o + 1$  éléments.

#### II.4 : STRUCTURE OPTIMALE DE REGLAGE D'ETAT:

La structure optimale de réglage d'état d'un système mono entrée mono sortie est donnée dans la Figure II.2. Dans ce cas, il y'a une seule grandeur de commande  $u(k)$  et une seule grandeur à régler  $y(k)$ . Par conséquent, il existe une seule grandeur de consigne  $w(k)$ . En plus on suppose qu'une seule grandeur de perturbation agit sur les grandeurs d'états du système. IL faut

encor prévoir un régulateur intégrateur qui réagit à l'écart de réglage  $e(k)$  afin de l'éliminer.

La grandeur de commande  $u(k)$  est fonction des coefficients de la copntre réaction d'état, et des deux facteurs d'intervention de la **consigne** et de la perturbation. le vecteur retour d'état est constitué d'une part par la contre réaction du vecteur  $x_s(k)$  du système, à réglé par l'intermediaire de  $k_s^T$  et d'autre part par l'intervention de la grandeur d'état du regulateur  $x_r(k)$  par l'intermediaire de  $k_r$ . Ce coefficient intervient dans la grandeur de commande par un signe négatif.

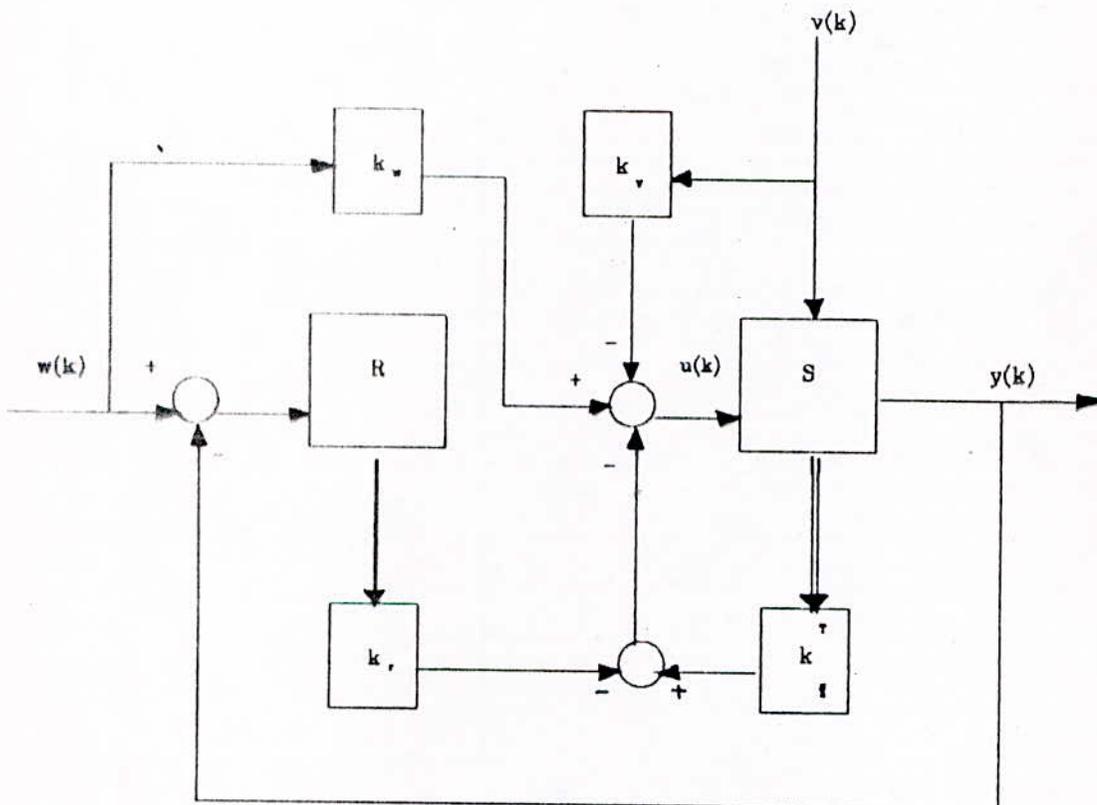


Figure II.2: Représentation de la structure optimale de réglage d'état [7].

#### II.4: Conclusion:

Nous avons présenté, dans ce chapitre, la structure optimale du réglage d'état et les équations du système à régler. Cette structure a été présentée par BÜHLER [7] pour le réglage des systèmes stationnaires, elle fait intervenir le retour d'état  $k^T$  et les coefficients d'intervention directe de la consigne et de la perturbation  $k_v$  et  $k_w$ . Dans les deux chapitres qui suivent, elle sera utilisée comme structure de base pour une commande adaptative. Dans ce but, notre contribution consiste à développer un certain algorithme qui permet d'adapter les coefficients de réglage aux changements de l'environnement et des paramètres du système, donc de réaliser le bloc d'adaptation.

Dans les chapitres suivants on présentera deux algorithmes faisant appel à cette structure. Il sera présenté un algorithme d'adaptation programmé, par placement de pôles. Le second est un algorithme auto-adaptatif par minimisation d'un critère quadratique.

**Chapitre III**

**COMMANDE ADAPTATIVE  
EN  
BOUCLE OUVERTE**

### III.1 : INTRODUCTION :

A la section ( § I.4.1), nous avons présenté le principe de réglage d'état adaptatif en boucle ouverte. Dans le présent chapitre, on présentera une méthode de calcul des coefficients de la contre réaction d'état, et les facteurs d'intervention de la consigne et de la perturbation  $k_w$  et  $k_v$  respectivement. Nous donnerons par la suite les principes et la structure de réglage qui seront ensuite étendu au cas adaptatif.

BÜHLER [7] a proposé une méthode de calcul des coefficients de réglage pour les systèmes stationnaires, permettant d'améliorer les performances en boucle fermée. Ces performances répondent aux exigences prédefinis par l'utilisateur. On présentera alors le principe de placement de pôle en boucle fermée adopté par BÜHLER pour calculer ces coefficients.

Dans la seconde partie de ce chapitre, l'utilisation de ces algorithmes, pour la commande adaptative, fera l'objet de notre étude. On présentera donc, les considérations prises pour les utiliser pour une adaptation programmée .

### III.2: METHODE DE BÜHLER:[7]

La figure I.2 rappelle la structure de réglage d'état. Dans cette structure, apparait la contre réaction d'état de  $x_s$  et  $x_r$ , ainsi que l'intervention directe des grandeurs de consigne et de perturbation. Les coefficients  $k_s^T$ ,  $k_s$ ,  $k_w$  et  $k_v$  sont à déterminer. Dans ce but, on considère  $k_s^T$  et  $k_r$  comme étant la contre réaction d'état du système global. En imposant les pôles, correspondant à une dynamique désiré en boucle fermé, il est possible de déterminer les coefficients de cette contre réaction. La détermination de  $k_w$  et  $k_v$  ne dépend pas des pôles imposés, leur détermination exige d'autre réflexions.

systemes d'équations:

Pour le système à régler, on peut établir les équations données dans (2.2). L'échantillonnage de ce système, a conduit à la forme discrète des équations d'états données par (2.3). Dans cette équation, on suppose a priori le cas d'un système réel avec  $d_s = 0$ . Le régulateur d'état obéit à la relation:

$$x_r(k) = \sum_{k=0}^{n-1} e(k) \quad (3.1)$$

Le vecteur d'état global, si le régulateur est introduit dans la boucle de réglage, ainsi que les équations d'états et de sortie, sont données par (4.1) et (4.2). L'écart de réglage est défini comme étant la différence entre la consigne et la sortie du système à régler. Elle est donnée par :

$$e(k) = w(k) - y(k) \quad (3.2)$$

Enfin, la grandeur de commande à calculer est donnée par la relation (2.6).

#### Pôles et équation caractéristique:

L'assignation des pôles  $p_1, p_2, \dots, p_n$  du système global fermé détermine l'équation caractéristique associée à la matrice  $F_c$ . L'équation s'écrit à l'aide des pôles :

$$\text{Det} (pI - F_c) = (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n) = 0 \quad (3.3)$$

Cette relation peut s'exprimer sous la forme d'un polynôme:

$$P(p) = p^n + \alpha_{n-1} p^{n-1} + \dots + \alpha_1 p^1 + \alpha_0 = 0 \quad (3.4)$$

La relation entre les pôles et les coefficients du polynôme caractéristique est donnée par le théorème de VIETE. Pour plus de détails, nous orientons le lecteur aux ouvrages [7] et [11].

Afin d'obtenir un comportement dynamique satisfaisant du réglage d'état, il est indispensable de choisir les pôles à imposer de manière adéquate (pôles garantissant un dépassement minimal par exemple). Il faut encore prendre des pôles qui assure la stabilité du système en boucle fermée.

#### II.2.1 : Détermination de la contre réaction d'état:

Pour la détermination des coefficients de la contre réaction d'état, on fait appel au principe de l'imposition des pôles. On parle souvent de l'assignation ou de placement des pôles. L'utilisation de cette méthode suppose que le système est commandable. On suppose aussi que les grandeurs d'états sont mesurables. Si ce n'est pas le cas, on devra avoir recours à des observateurs d'états. Mais cela ne fait pas partie de notre travail.

Pour des raisons théoriques, mais aussi pratiques, on fait appel à la forme canonique de réglage.  $T$  est la matrice de transformation qui doit être déterminé selon le procédé montré dans [7] et [10]. La détermination de  $k^T$  passe par cette représentation. Sachant que le vecteur retour d'état doit être calculé de façon à avoir :

$$\text{Det} (pI - F_{Gr}) = \text{Det} ( pI - F_r + h_r \cdot k_r^T ) \quad (3.5)$$

ou  $F_{Gr}$ ,  $F_r$ ,  $h_r$  sont les formes canoniques de réglage de  $F_G$ ,  $F$  et  $h$  respectivement. De (3.5) on trouve que:

$$F_{Gr} = F_r - h_r \cdot k_r^T \quad (3.6)$$

ainsi on trouve :

$$k_r^T = [ k_{r1} \ k_{r2} \ \dots \ k_{rn} ] \quad (3.7)$$

avec

$$k_{ri} = \alpha_{i-1} - a_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.7.a)$$

et le retour d'état recherché est alors donné par:

$$k^T = k_r^T \cdot T \quad (3.8)$$

à noter que les  $a_i$  sont les coefficients du polynôme caractéristique global en boucle ouverte:

$$\text{Det} ( pI - F ) = 0 \quad (3.9)$$

### III.2.2 : Détermination du coefficient de l'intervention directe de la grandeur de consigne:

Pour calculer le coefficient  $k_w$ , on peut exiger que le régulateur n'intervienne pas en régime établi et en absence de la grandeur de perturbation. On exige donc que  $x_r = 0$  en ce régime. Dans ce cas, la grandeur de sortie dépend uniquement de la grandeur de consigne par l'intermédiaire de  $k_w$ . on montre alors que [7]:

$$k_w = \frac{1}{c_s^T (1 - F_s + h_s k_s^T) h_s} \quad (3.10)$$

Dans ce cas, le régulateur intégrateur ne joue aucun rôle en régime établi, et lorsque la perturbation est inexistante.

L'expérience montre qu'on obtient, en utilisant cette formule, un dépassement par fois important pour la réponse par rapport à la grandeur de la consigne. En général, un tel dimensionnement de  $k_w$  n'est pas favorable. Une autre possibilité qui donne de bons résultats, consiste à dimensionner le coefficient  $k_w$  de façon à compenser un pôle du système global fermé. on peut montrer alors que [7]:

$$k_w = \frac{k_r}{(1 - p_1)} \quad (3.11)$$

ou  $p_1$  est le pôle à compenser.

### 111.2.3 : Détermination du coefficient d'intervention directe de la grandeur de perturbation:

Pour déterminer le coefficient  $k_v$  de l'intervention directe de perturbation, on applique les mêmes critères que dans le cas précédent. L'exigence que le régulateur n'ait pas à intervenir en régime établi, donne en général de bons résultats. on montre que [7]:

$$k_v = \frac{c_s^T (1 - F_s + h_s k_s^T) h_{sv}}{c_s^T (1 - F_s + h_s k_s^T) h_s} \quad (3.12)$$

Cependant, l'approche de compensation d'un pôle en boucle fermée, n'est pas recommandée dans ce cas là. Elle nécessite beaucoup de calcul et elle ne donne pas de bons résultats [7]. Il est donc recommandé, lorsque l'ordre du système est élevé

d'utiliser l'approche de compensation pour déterminer  $k_v$  et supposer  $x_r = 0$  pour déterminer  $k_v$ .

### III.3 : REGLAGE D'ETAT ADAPTATIF EN BOUCLE OUVERTE:

La méthode que nous allons présenter dans cette section se base sur le principe de réglage d'état des systèmes stationnaires. En effet, en utilisant la structure de réglage donnée dans la figure II.1 on peut mettre en évidence une commande adaptative en boucle ouverte. Il sera présenté dans ce qui suit l'adaptation programmée.

#### III.2.2: STRUCTURE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE.

Notre contribution consiste essentiellement à étendre l'algorithme de BÜHLER au cas adaptatif. Ceci consiste à mettre en évidence le bloc d'adaptation. ce bloc contient les coefficients de réglage préalablement calculés.

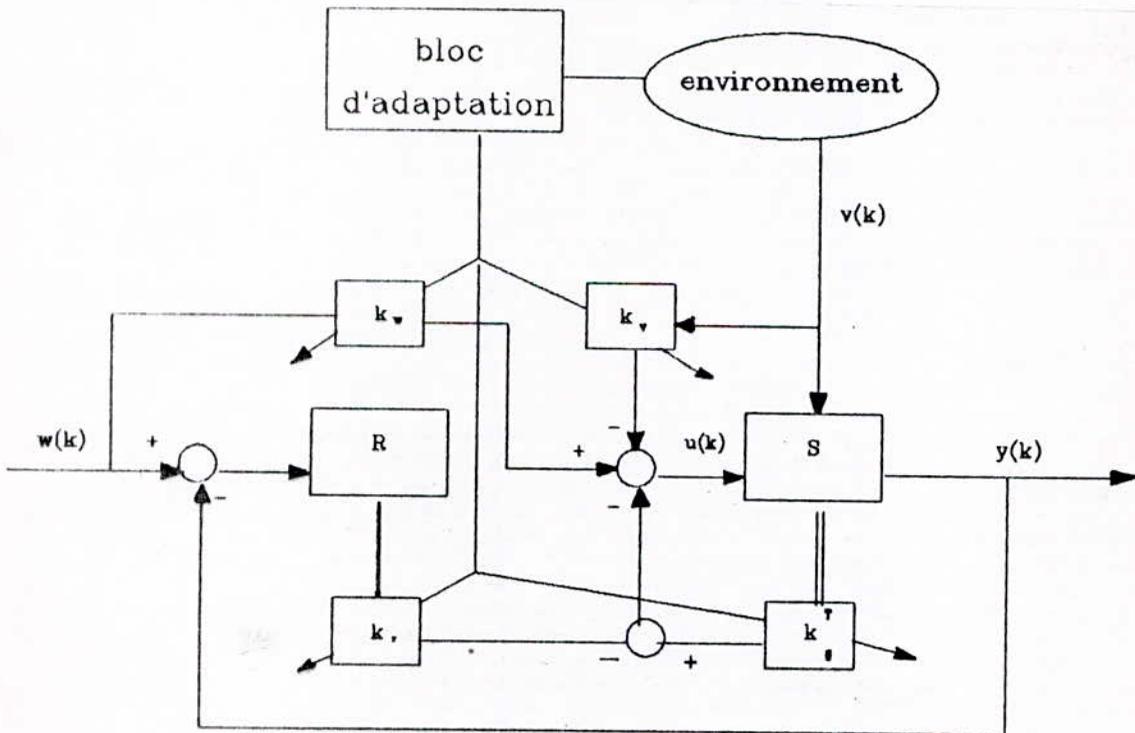


Figure IV.1: Structure de réglage adaptatif en boucle ouverte.

Nous avons donc pris la structure de la figure II.2, nous avons ensuite réalisé le bloc d'adaptation qui est constitué d'une table contenant les coefficients de réglage, préalablement calculés, correspondant aux différentes mesures de l'environnement, représentant des changements prévus de celui-ci.

### III.3.2: DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE REGLAGE:

Les principes adoptés pour calculer les coefficients de réglage, pour une commande adaptative en boucle ouverte, sont les mêmes que ceux adoptés pour le cas des systèmes stationnaires. En effet, le principe de placement des pôles, pour déterminer le retour d'état, annuler la grandeur d'état du régulateur en régime établi, pour les coefficients d'intervention directe de la consigne et de la perturbation, ou de compensation d'un pôle en boucle fermée pour le coefficient  $k_v$ , restent toujours valables.

Afin que ce réglage donne de bons résultats, plusieurs hypothèses ont été prises en considérations.

La perturbation est considérée comme constante pendant toute la période d'échantillonnage. En plus, cette perturbation étant mesurable, nous pouvons donc dire que notre problème consiste à ramener le procédé à l'état d'équilibre, à partir d'un état initial (perturbé).

La consigne fait aussi partie de l'environnement. Le changement de cette dernière est pris en considération par le bloc d'adaptation exactement comme la perturbation ou le changement de paramètre du système.

L'idée principale, pour réaliser le bloc d'adaptation, consiste à calculer préalablement tous les coefficients de réglage, correspondant aux différents cas qui peuvent être rencontrés par le procédé, au cours de son déroulement. Ces coefficients sont donnés par les relations (3.6) à (3.8) pour le calcul du retour d'état, les relations (3.10), (3.11) et (3.12) pour les coefficients  $k_v$  et  $k_v$ . (3.8), (17), (20)

A chaque instant, ou le système se trouve dans une situation qui a été déjà prévu par l'utilisateur, le bloc d'adaptation fournit aux système les coefficients de réglage qui lui permet de garder ou améliorer les performances.

#### III.4 : Conclusion

Quoique le principe d'adaptation programmée est facile et donne de bons résultats, dans les conditions déjà citées. Sa mise en oeuvre pratique n'est, parfois, pas recommandée. Cela est du au fait qu'elle nécessite l'introduction de plusieurs capteurs, pour la mesure de l'environnement. L'autre inconvénient est, si pour une raison ou une autre, la relation qui relie l'environnement au système à commander, change de façon imprévue. Cela risque de conduire à des résultats catastrophiques. Il faut donc bien faire attention lors de l'utilisation de ce type de commande.

**Chapitre IV**

**COMMANDE ADAPTATIVE  
EN  
BOUCLE FERMEE**

#### IV.1 : INTRODUCTION :

La commande adaptative en boucle fermée, par minimisation d'un critère quadratique, a fait l'objet de la majorité des études théoriques effectuées dans ce domaine. Après avoir présenté à la section ( § I.4 ) le principe général de la commande adaptative en boucle fermée, nous présentons, dans ce chapitre deux algorithmes correspondant à ce type de commande. L'un a été proposée par SAMSON (1982), l'autre par HARRIS & BILLINGS (1985). Enfin, nous présentons une autre méthode basée sur le même principe, ou nous utilisons la structure de réglage donnée dans la Figure II.2. A cette structure on ajoute la deuxième boucle de contre réaction, afin de la rendre adaptative. Le but de notre intervention est de réaliser une commande auto-adaptative. Le bloc d'adaptation fait donc l'objet de notre contribution.

#### IV.2 : METHODE DE SAMSON :

La commande adaptative indirecte donnée par SAMSON (1982), est une commande à modèle de référence [13]. Elle est basée sur la minimisation d'un critère quadratique donnée par:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \{ (y(k) - y_m(k))^2 q_e + r_x u^2(k) \} \quad (4.1)$$

$y_m$  étant la trajectoire désirée.

Le modèle du procédé à régler, qui a été utilisé par SAMSON est donné par les équations d'état suivante:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F x(k) + h u(k) + h_v v(k) \\ y(k) &= c^T x(k) + v(k) \end{aligned} \quad (4.2)$$

avec les  $a_i$  et les  $b_i$  sont les paramètres du système à commander. les  $\alpha_i$  sont par contre les coefficients du polynôme caractéristique du système en boucle fermée, définissant la dynamique désirée de ce dernier.

$$F = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ -a_n & 0 & \dots & & 0 \end{bmatrix} \quad h = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} \quad h_v = \begin{bmatrix} \alpha_1 - a_1 \\ \alpha_2 - a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_n - a_n \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$c^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

une forme d'état augmenté est donnée par:

$$X(k+1) = F_I X(k) + h_I u(k) + h_{vI} v(k) \quad (4.4)$$

$$y(k) = c_I^T X(k) + v(k)$$

avec  $F_I$ ,  $h_I$ ,  $h_{vI}$  et  $c_I$  sont données par:

$$F_I = \begin{bmatrix} F & \underline{0} \\ c^T & \underline{0^T} \\ \underline{0} & I_{n-1} \end{bmatrix} \quad h_I = \begin{bmatrix} h \\ \underline{0} \end{bmatrix} \quad h_{vI} = \begin{bmatrix} h_v \\ 1 \\ \underline{0} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$c_I^T = [c^T \ \underline{0^T}]$$

on a alors

$$x(k) = B(\theta) \cdot \phi(k-1)$$

$$B(\theta) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n & b_1 & b_2 & b_3 & \dots & b_n & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_n \\ a_2 & a_3 & \dots & a_n & & b_2 & b_3 & \dots & b_n & & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_n & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ a_n & & & & & b_n & & & & & \alpha_n & & & & \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ou :

$$\begin{aligned} \theta^T &= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n] \\ \phi^T(k-1) &= y(k-1) \dots y(k-n) \ u(k-1) \dots u(k-1) \\ &\quad e(k-1) \dots e(k-1) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Le critère quadratique peut être présentée sous une autre forme dans le cas où la trajectoire désirée est une sortie d'un modèle de référence :

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \{ (X(k) - X_m(k))^T Q (X(k) - X_m(k)) + r_x u^2(k) \} \quad (4.8)$$

La commande adaptative indirecte, proposée par SAMSON, est la suivante:

- i) On calcule à l'instant  $k$  le vecteur  $\hat{\theta}(k)$  à l'aide d'un algorithme d'approximation stochastique.
- ii) On utilise l'observateur adaptatif:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{X}(k) \\ y(k-1) \\ \cdot \\ \cdot \\ y(k-n) \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \dot{\hat{X}} = B(\hat{\theta}(k)) \cdot \psi(k-1) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \psi^T(k-1) &= y(k-1) \dots y(k-n) \ u(k-1) \dots u(k-n) \\ &\quad e(k-1) \dots e(k-1) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{\theta}(k) \cdot \psi(k-1)$$

$e$  est l'erreur de prédiction.

- iii) On applique la commande :

$$u(k) = -k^T \hat{X}(k) - l(k) e(k) + z(k) \quad (4.11)$$

$k^T(k)$ ,  $l(k)$  et  $z(k)$  sont donnés par:

$$k^T(k) = (h_I^T P(k) h_I + r_x)^{-1} h_I^T P(k) F_I \quad (4.12)$$

$$l(k) = (h_I^T P(k) h_I + r_x)^{-1} h_I^T P(k) h_{vI}$$

$$z(k) = (h_I^T P(k) h_I + r_x)^{-1} h_I [QX_m(k+1) + \dots + (F_I - h_I k^T)^{N^T} QX(k+1+N)] \quad (4.13)$$

$P(k)$  étant la solution de l'équation de RICATTI:

$$P(k) = Q + F_I^T P(k-1) \{ [1 - h_I (h_I^T P(k-1) h_I + r_x)^{-1} h_I^T P(k-1)] F_I \} \\ P(0) = Q \quad (4.14)$$

$$\text{ou } Q = D^T D \\ \text{avec } D^T = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n] \quad (4.15)$$

Cependant, il est à noter que l'algorithme d'estimation vérifie certaines propriétés:

- $\hat{\theta}(k)$  borné.
- $y(k) - \hat{\theta}(k) \cdot \psi(k-1)$  borné.
- $\| \hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1) \| \rightarrow 0$ .

Remarque:

On ne peut rien dire, à partir de cette méthode, sur la poursuite de sortie du procédé à la trajectoire désirée. Cette poursuite est seulement bonne au sens du critère.

#### IV.3 : METHODE DE HARRIS & BILLINGS :

La méthode donnée par HARRIS & BILLINGS est une commande auto-adaptative. Elle est aussi basée la minimisation d'un critère quadratique. C'est une commande en boucle fermée. Elle est de type indirecte. C'est une commande auto-adaptative.

Le procédé à régler a la même représentation donnée par les relations (4.2) et (4.3). Dans cette méthode HARRIS & BILLINGS ont utilisé la représentation d'état augmentée donnée par les équations (4.4) et (4.5).

Le critère quadratique à minimiser est :

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q x_k + r_x u^2(k)) \quad (4.16)$$

La minimisation de ce critère conduit à la loi de commande suivante :

$$\begin{aligned} u(k) &= k^T x(k) \\ \text{ou } k^T(k) &= F_I^T k_1(k) \\ \text{avec } k_1(k) &= \frac{P(k-1) h_I}{r_x + h_I P(k-1) h_I} \end{aligned} \quad (4.17)$$

ou  $P(k)$  est la solution de l'équation de RICATTI :

$$\begin{aligned} P(k) &= F_I^T (1 - k_1(k) h_I^T P(k-1) h_I) F_I + Q \\ \text{avec } P(0) &= Q \end{aligned} \quad (4.18)$$

On remarque que les deux algorithmes ont la même forme.

#### IV.4: COMMANDE ADAPTATIVE EN BOUCLE FERMMEE :

Pour reprendre la même idée développée par SAMSON et afin de réaliser une commande adaptative en boucle fermée, de type indirecte, nous prenons le critère quadratique (2.7) donné par BUHLER [7].

La minimisation de ce critère permet de calculer de façon recursive les coefficients de réglage. Les formules recurrentes se prêtent bien à une commande autoadaptative (commande on line).



#### IV.4.2 : Calcul récursif des coefficients de réglage.

La minimisation du critère quadratique (2.7) présenté a la section (§ II.2 ) permet de calculer de façon récursive les coefficients de réglage. la formule récurrente a l'avantage de bien se prêter au calcul de la commande en temps réel, sur calculateur numérique.

A l'instant k on calcul les paramètres du procédé, suivant les relations définies à priori par l'utilisateur. Le bloc s'occupant de cette tâche, remplace le bloc d'estimation présenté dans la Figure I.3. On calcul ensuite, en fonction des nouveaux paramètres les coefficients de réglage. Les paramètres du système doivent vérifier les conditions:

- $\theta(k)$  borné.
- $y(k) - y_m(k) = 0$ .
- $\| \theta(k) - \theta(k-1) \| \rightarrow 0$ .

ou  $y_m(k)$  est la sortie calculée en fonction des paramètres donnés par les relation prédéfinies par l'utilisateur.

On applique ensuite la loi de commande et ces paramètres qui sont donnés par les relation suivantes:

La loi de commande:

$$u(k) = -k^T X(k) + k_w w(k) - k_v v(k) \quad (4.19)$$

ou

$$k^T = [ k_s^T \quad -k_r ]$$

qui sera donné par:

$$k^T = [h^T \cdot P(k) \cdot h + r_x]^{-1} \cdot h^T \cdot P(k) \cdot F \quad (4.20)$$

Le facteur d'intervention de la consigne:

$$k_w(k) = (h^T P(k) h + r_x)^{-1} h^T (T(k) - P(k) h_w) \quad (4.21)$$

Le facteur d'intervention de la perturbation:

$$k_v(k) = (h^T P(k) h + r_x)^{-1} h^T (s(k) + P(k) h_v) \quad (4.22)$$

ou  $P(k)$  est la solution de l'équation de RICATTI:

$$P(k) - Q + F^T P(k-1) ([1 - h(h^T P(k-1)h + r_x)^{-1} h^T P(k-1)] F)$$

(4.23)

les vecteurs  $T(k)$  et  $S(k)$  sont donnés par:

$$T(k) - c^T q_0 + ([1 - h(h^T P(k-1)h + r_x)^{-1} h^T P(k-1)] F)^T (T(k-1) - P(k-1)h_w)$$

(4.24)

$$S(k) - ([1 - h(h^T P(k-1)h + r_x)^{-1} h^T P(k-1)] F)^T (S(k-1) + P(k-1)h_v)$$

(4.25)

avec comme conditions initiales:

$$P(0) = Q,$$

$$T(0) = c^T \cdot q_0,$$

$$S(0) = 0.$$

#### CONCLUSION :

La première conclusion à tirer est que ces méthodes sont données sous forme récurssive. Un avantage d'une formule récurrente des algorithmes de commande adaptative, est qu'elle se prete bien à la commande en temps réel. L'autre avantage est de ne pas avoir a mettre en mémoire les données entrées-sorties. Elle permet aussi de réduire la complexité des algorithmes, et donc de pouvoir être facilement implanté sur calculateur.

**Chapitre V**

**APPLICATIONS**

## V.1 : INTRODUCTION

Dans les deux derniers chapitres, nous avons présenté deux algorithmes de commande adaptative. Le premier algorithme est basé sur le principe de placement des pôles, qui permet de calculer a priori les coefficients de réglage. Tandis que le second est basé sur le principe de minimisation d'un critère quadratique, qui permet de déterminer ces coefficients de façon récursive.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques applications, pour lesquelles nous donnerons par la suite les résultats obtenus, suivis de conclusions tirées à partir de ces essais. Dans ce but, nous aurons à développer deux algorithmes en turbo pascal, qui présentent l'avantage d'être très rapides en exécution, afin de simuler ensuite une commande pour un système donné.

Les deux programmes sont écrits en mode conversationnel, ce qui rend leur utilisation assez souple.

## V.2. PRESENTATION DU PROCEDE :

Afin de faciliter les calculs, et comme le système d'ordre deux est généralement le plus utilisé en théorie, on considère comme exemple d'application un système linéaire monoentrée-monosortie échantillonné de cet ordre là. Une représentation d'état de ce système est donné par les équations suivantes [7]:

$$\begin{aligned}x_s(k+1) &= F_s x(k) + h_s u(k) + h_{sv} v(k) \\ y(k) &= c_s^T x(k)\end{aligned}\tag{5.1}$$

ou  $F_s$ ,  $h_s$ ,  $h_{sv}$  et  $c_s$  sont donnés par:

$$\begin{aligned}F_s &= \begin{bmatrix} 0.607 & 0.239 \\ 0 & 0.368 \end{bmatrix} & h_s &= \begin{bmatrix} 0.155 \\ 0.632 \end{bmatrix} & h_{sv} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ c_s^T &= [ 1 \quad 0 ]\end{aligned}\tag{5.2}$$

avec  $d_s = 0$ . On suppose dans ce cas que le système est réel.

L'introduction d'un régulateur intégrateur conduit aux équations globales:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F x(k) + h u(k) + h_v v(k) \\ y(k) &= c^T x(k) \end{aligned} \quad \text{avec} \quad (5.3)$$

$$x(k) = \begin{pmatrix} x_s \\ x_r \end{pmatrix}$$

$F$ ,  $h$ ,  $h_v$  et  $c^T$  sont donnés, d'après les relations (2.5) par :

$$F = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.239 & 0 \\ 0 & 0.368 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad h = \begin{bmatrix} 0.155 \\ 0.632 \\ 0 \end{bmatrix} \quad h_w = \begin{bmatrix} +0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad h_v = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c^T = [1 \quad 0 \quad 0]$$

(5.4)

Enfin, quelques hypothèses sont prises en considération afin de ne pas avoir à utiliser un observateur d'état ni un estimateur de paramètres. Ces hypothèses sont:

- Les états du système sont accessibles et mesurables,
- Les paramètres du système à commander varient, en fonction des perturbations et les changements de l'environnement, suivant des relations connues,
- Les perturbations sont mesurables.

Dans notre étude, on mis en évidence l'influence d'un changement de consigne, d'une perturbation fugitive, d'une perturbation constante et d'une perturbation aléatoire (représentée par un bruit blanc de moyenne nulle et d'écart type constant  $\sigma$ ).

**Remarque :**

On fait l'hypothèse que les relations liant l'environnement aux paramètres du système sont linéaires.

### V.3 : METHODE D'ADAPTATION EN BOUCLE OUVERTE :

Notre système étant soumis à des changements prévus, le programme élaboré permet de calculer les coefficients de réglage  $k_o$ ,  $k_r$ ,  $k_v$  et  $k_v$ . Nous considérons que la perturbation est bornée, de même pour la consigne, aussi nous considérons que la façon avec laquelle ces deux grandeurs varient, est connue.

Pour plusieurs mesures de la perturbation et de la consigne, nous calculons les coefficients de réglage correspondants suivant les relations établies dans le chapitre trois. Ces derniers seront ensuite stockés dans une table qui se trouve dans le bloc d'adaptation. L'algorithme de réglage fait en sorte qu'à chaque mesure de l'environnement, il consulte la table des coefficients, tire les plus appropriés pour calculer la commande nécessaire. C'est donc une commande en temps différé qu'on est entrain de faire.

#### Remarque :

Si le calculateur numérique lié au système à commander est très rapide par rapport au système lui même, et que ce dernier possède un régime transitoire lent, on peut alors mesurer l'environnement et faire le calcul des coefficients de réglage en même temps. On réalise donc une commande en temps réel.

### V.4 : METHODE D'ADAPTATION EN BOUCLE FERMEE :

Notre système est soumis à des changements, qui sont cette fois-ci imprévus. Les relations qui lient la perturbation aux paramètres du système restent connues. Le programme élaboré consiste à calculer, en fonction des mesures faites sur l'environnement (les perturbations étant mesurables), les paramètres du système suivant les relations linéaires préalablement établies dans le bloc d'adaptation. On suppose que la variation des paramètres est lente et faible. Le bloc d'adaptation minimise ensuite le critère quadratique (2.7) en

prenant en considération les nouvelles valeurs des paramètres du système à commander. Le calcul des coefficients de réglage se fait de façon récursive pour donner la commande nécessaire pour avoir la sortie désirée.

Comme la sortie dépend fortement des coefficients de pondération contenus dans le critère à minimiser, on fait plusieurs essais pour choisir les bonnes valeurs. On trouve alors les résultats suivants:  $q_0 = 0.9$  pour le coefficient de pondération de la consigne,  $r_x = 1$  pour le coefficient de pondération de l'entrée. La matrice de pondération  $Q$  étant calculée en fonction des coefficients du polynôme caractéristique en boucle fermée définissant la dynamique désirée. Les coefficients de réglage sont calculés de façon récursive à partir des relations données par (4.19), (4.20) et (4.21).

#### V.5 : PRESENTATION DES RESULTATS :

Notre objectif est d'assurer une poursuite, de la sortie du système de commande, d'une certaine consigne, avec élimination ou diminution de la perturbation.

Afin d'avoir une dynamique qui assure certaines performances en boucle fermée (réponse rapide avec dépassement minimum), nous avons fait plusieurs essais pour choisir les pôles qui les assurent. On obtient ainsi comme pôles en boucle fermée les résultats suivants :

$$\begin{aligned} P_1 &= 0.2 + j*0.31 \\ P_2 &= 0.2 - j*0.31 \\ P_3 &= 0.98 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Le système étant échantillonné, ces pôles se trouvent à l'intérieur du cercle unité, ils assurent la stabilité du système.

Dans la première série d'essais, nous avons étudié le cas d'un changement de consigne, ou on considère deux cas possibles pour calculer le coefficient  $k_w$ .

Le premier cas ou  $x_r$ , grandeur d'état du régulateur intégrateur,

soit nulle en régime établi (Figure I.1.a) et (Figure I.2.a). Le second cas on calcul  $k_v$  de façon à compenser le troisième pôle (Figure I.1.b) et (Figure I.2.b). On remarque que dans les deux cas, et lorsque le principe adopté est le placement de pôles, la sortie du système suit la consigne, même si celle ci change de façon brusque à un instant donné. Lorsque le principe adopté pour le calcul des coefficients de réglage est minimisation d'un critère quadratique, il faut, en plus ~~avec~~ des pôles imposés en boucle fermée, bien choisir les coefficients de pondérations de la consigne et de l'entrée afin d'assurer une bonne poursuite (Figure II.1.a). La Figure II.1.b représente le cas où les coefficients de pondération sont mal choisis, dans ce cas la sortie ne suit plus la consigne.

La deuxième série d'essais consiste à voir l'effet de perturbation. Ces derniers se présentent sous deux formes : déterministes et stochastique. Dans le cas de la commande en boucle ouverte la perturbation l'algorithme arrive toujours à rejeter une perturbation déterministe: la Figure I.3 a et b représente le cas de la perturbation fugitive. La Figure I.4.a et b représente le cas de la perturbation constante. L'algorithme permet une réjection rapide et totale d'une perturbation se présentant sous ces deux formes. Lorsque on prend  $x_r = 0$  en régime établi, pour déterminer  $k_v$  (Figure I.3.a) et Figure (I.4.a) ou compenser un pôle (Figure I.3.b) et Figure (I.4.b), ces deux approches donnent de bons résultats lorsque l'ordre du système n'est pas élevé.

Dans le cas stochastique l'algorithme permet toujours la poursuite de la consigne par la sortie et la diminution de l'erreur entre les deux. Les Figures I.4.a,b,c représente le cas d'une telle perturbation qui influence sur le système et ses paramètres. Dans ces figures la sortie suit la consigne avec des dépassements acceptables. L'écart type de cette perturbation ne doit pas être très grand, si non elle devient très importante.

Dans le cas où la perturbation est déterministe et constante, l'algorithme de la commande en boucle ouverte permet

une bonne prise en compte et élimination de celle-ci.

Le deuxième algorithme par contre ne permet pas cela et exige un calcul automatique des coefficients de pondération, pour que la sortie suit toujours la consigne. Ce calcul ne peut pas se faire de cette manière, ces coefficients étant imposés au début par l'utilisateur.

Lorsque la consigne a une forme particulière cosinusoidale ou trapezoidale, les deux algorithmes donnent de bons résultats (fig I.10 , I.9 et I.11) pour la méthode de placement de pôles et (fig II.7 , II.8 , II.9 , et II.10) pour la méthode de minimisation d'un critère quadratique.

Enfin, dans le cas où les paramètres du système varient dans une plage très grande, la méthode du placement de pôles donne toujours de bons résultats, quand à la poursuite de la consigne (fig I.8); mais la deuxième méthode donne de mauvais résultats (fig II.5).

Un cas particulier a été étudié. C'est l'influence du coefficient d'intervention de la perturbation. Lorsque le coefficient introduit dans le calcul de la commande n'est pas le même que celui qui a été calculé, pour que  $x_r = 0$  en régime permanent, la sortie est influée par ce changement et ne suit plus la consigne. Lorsque nous avons pris  $k_v = k_v(\text{calculé})/2$ , la sortie a chuté de plus de la moitié. Cela veut dire que nous avons amplifié la perturbation (Figure I.4.c).

#### V.6 : CONCLUSION :

A partir des résultats obtenus de la simulation on peut tirer les conclusion suivante:

Les constatations faites pour le cas de la commande en boucle ouverte (adaptation programé):

- i)- L'algorithme assure une bonne poursuite de la consigne avec la dynamique désirée.
- ii)- Une rejection totale et rapide de la perturbation fugitive et constante.
- iii)- diminution des perturbations aléatoires.

iv)- L'algorithme permet de compenser le changement prévu des paramètres, pour une plage de variation large, dans le cas déterministe, et restreinte dans le cas stochastique.

Pour le cas de la commande en boucle fermée, on fait les constatations suivantes:

- i)- La poursuite de la trajectoire désirée est dans ce cas bonne au sens du critère ( dépend des coefficients de pondération).
- ii)- une rejection des perturbation fugitives.
- iii)- Les perturbations constantes influent sur la trajectoire de la sortie du procédé. Cette perturbation n'est pas totalement rejeté.
- iv)- les perturbation aléatoires sont diminués.
- v)- lorsque les paramètres varient dans une plage courte la sortie suit la trajectoire désirée. Dans le cas contraire, la sortie du procédé s'éloigne de cette dernière.

RESULTATS  
DE LA  
SIMULATION

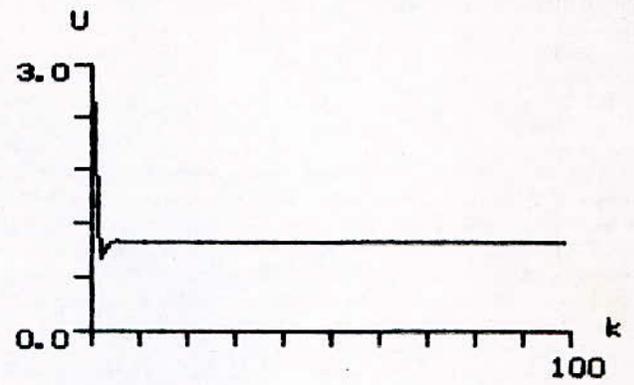
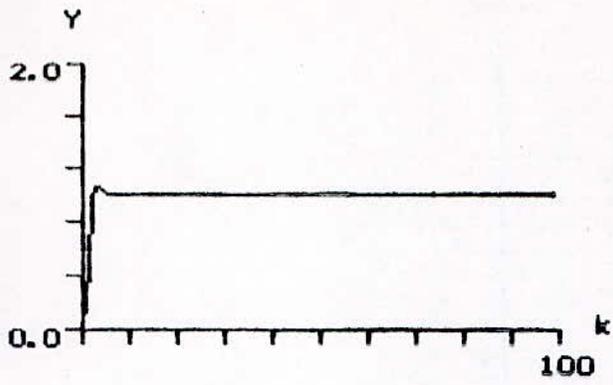


Figure A

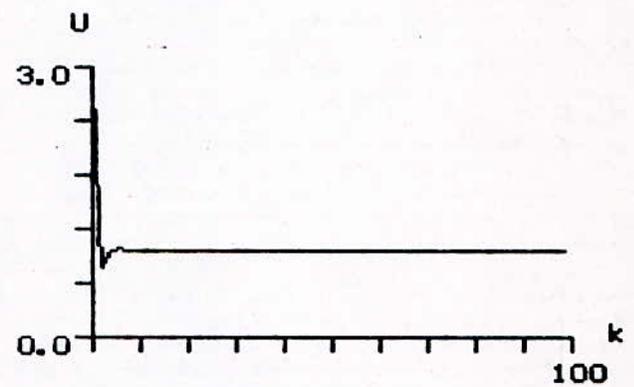
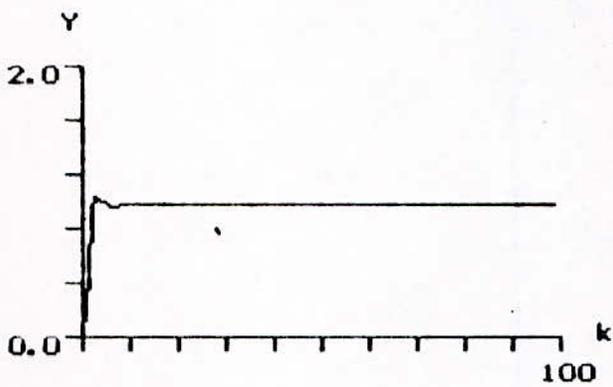


Figure B

Fig I.1: Réponse à un échelon de consigne

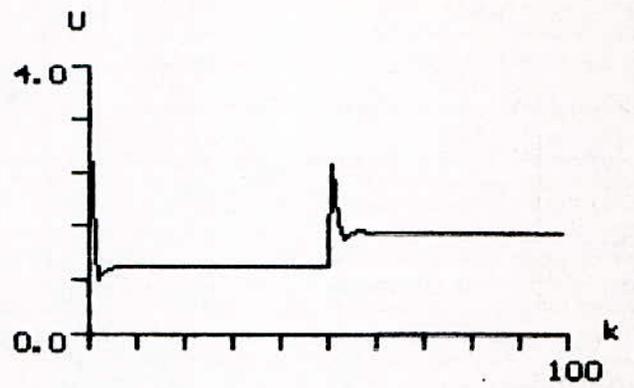


Figure A

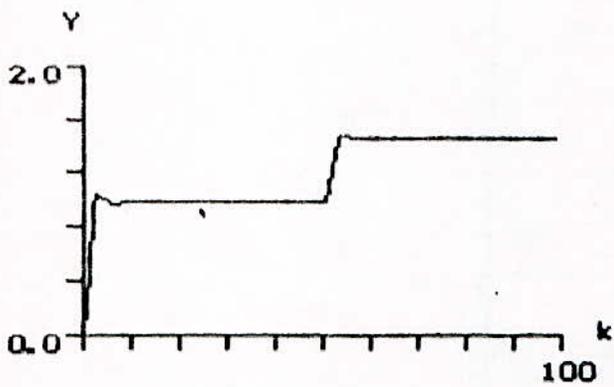


Figure B

Fig I.2: Reponse à une variation de consigne

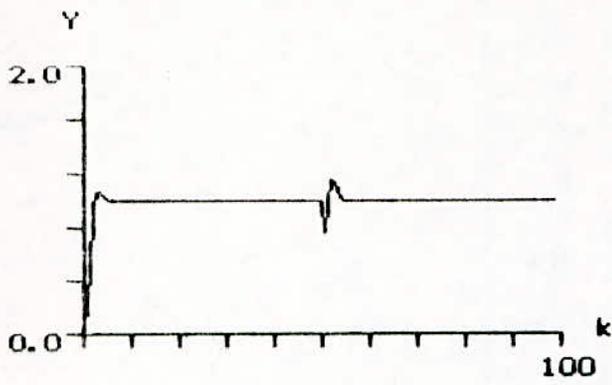


Figure A

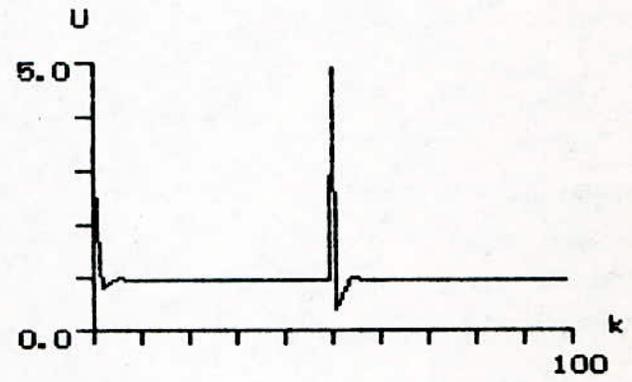
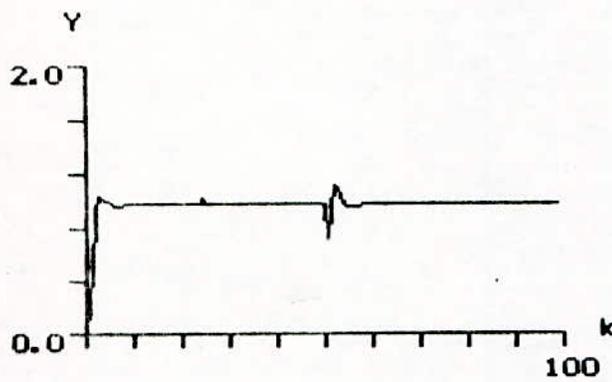


Figure B

Fig I.3: Reponse à un échelon + perturbation fugitive

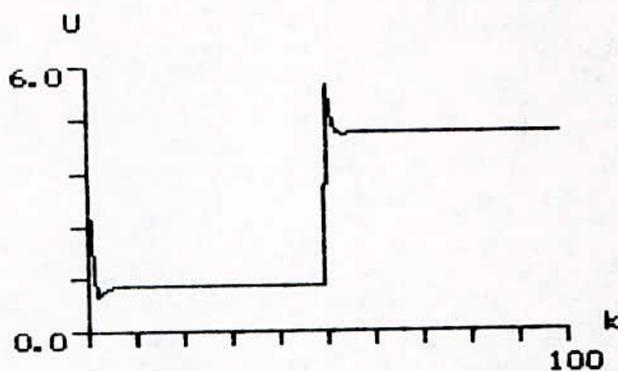
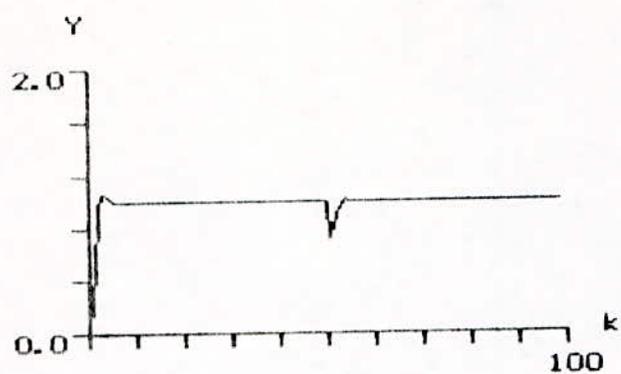


Figure A

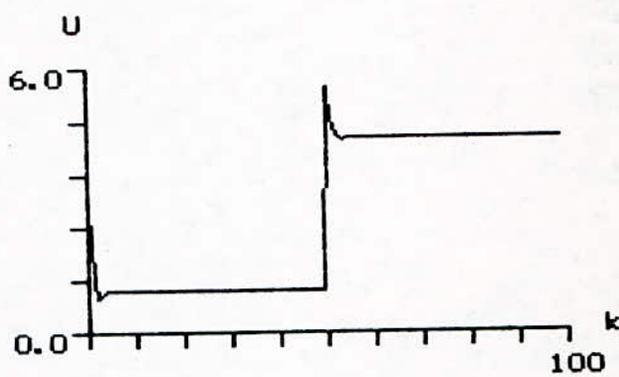
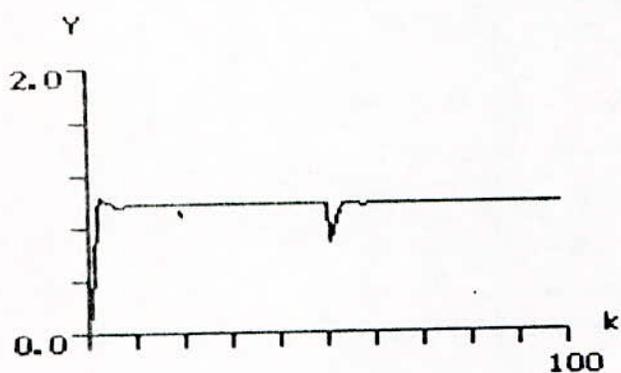


Figure B

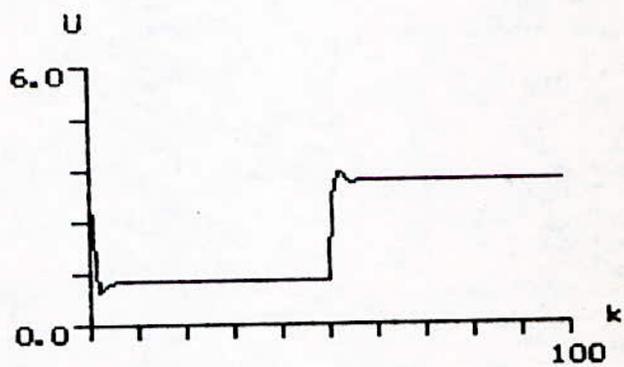
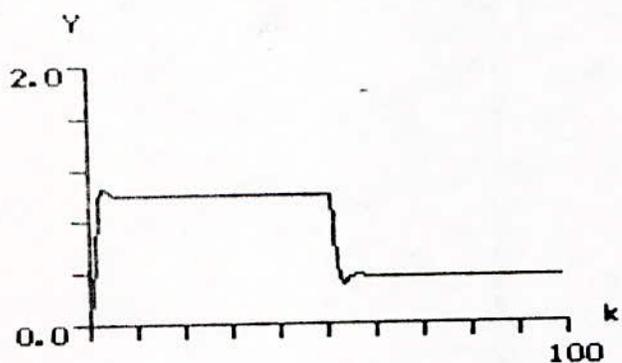


Figure C

Fig I.4: Reponse à une perturbation constante

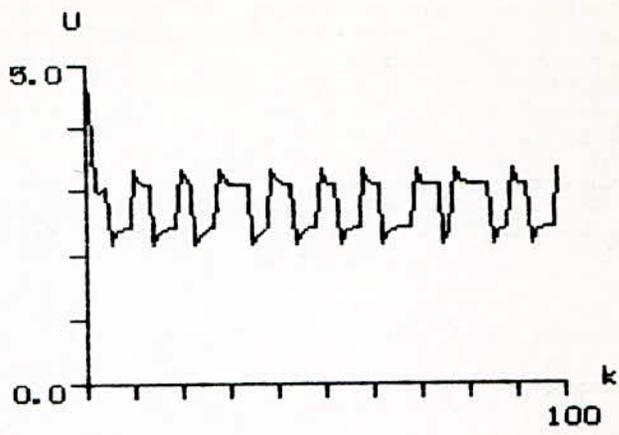
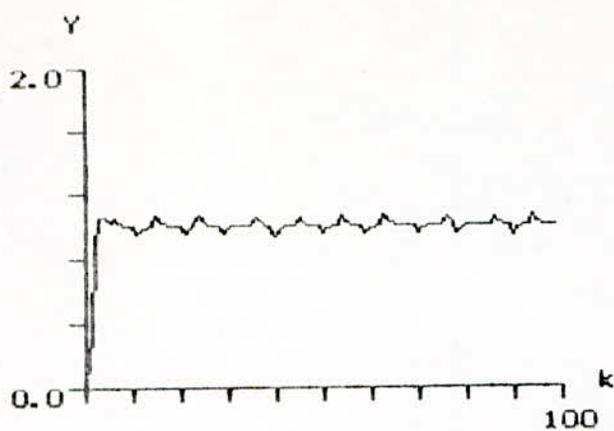


Figure A

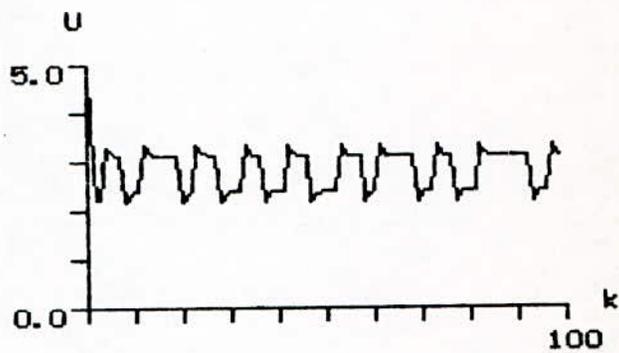
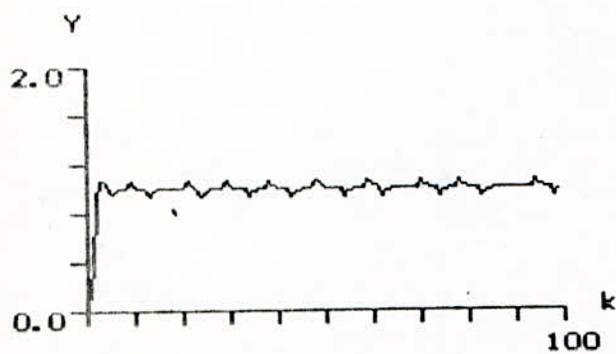


Figure B

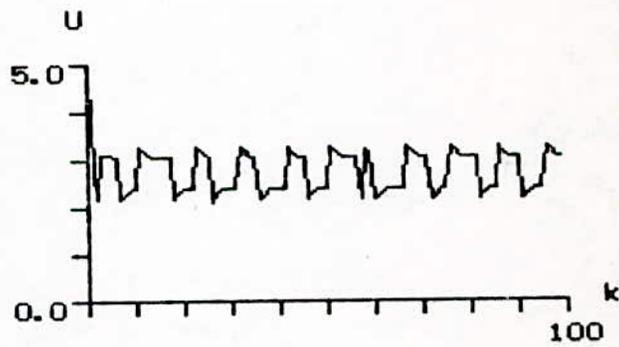
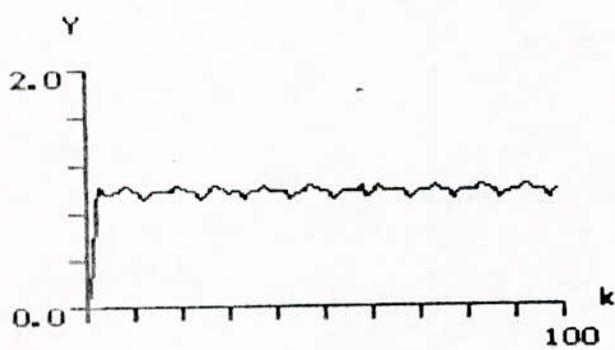


Figure C

Fig 1.5: Reponse à un échelon de consigne+ bruit blanc

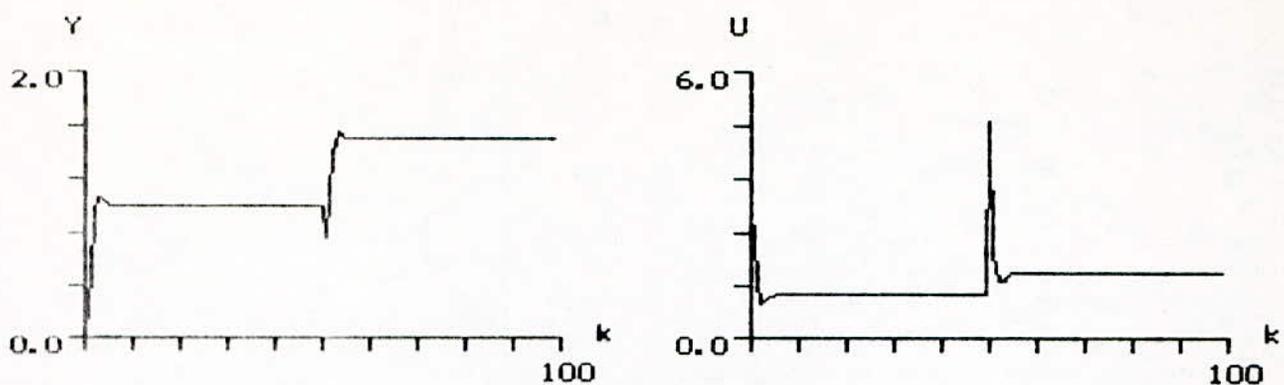


Fig I.6: Reponse à un changement de consigne avec perturbation fugitive

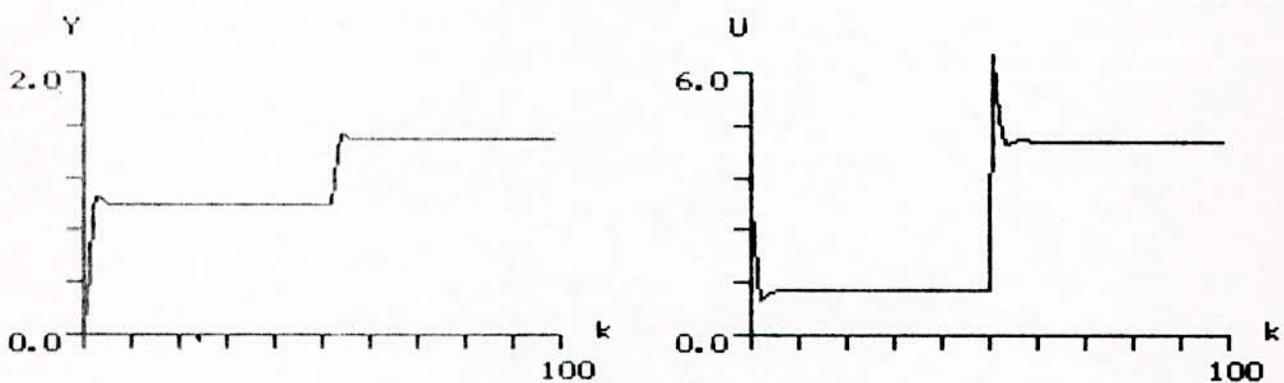


Fig I.7: Reponse à un changement de consigne avec perturbation constante

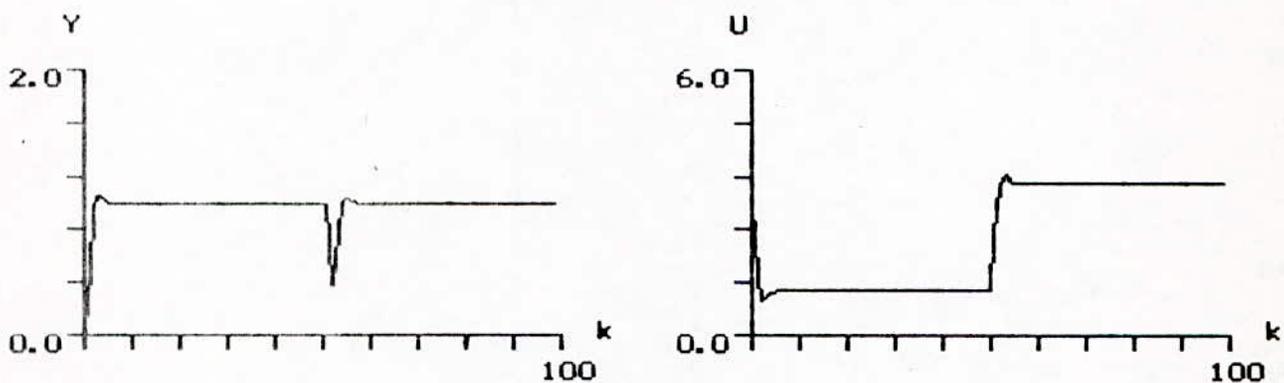


Fig: I.8: Reponse à un échelon avec changement des parametre du système

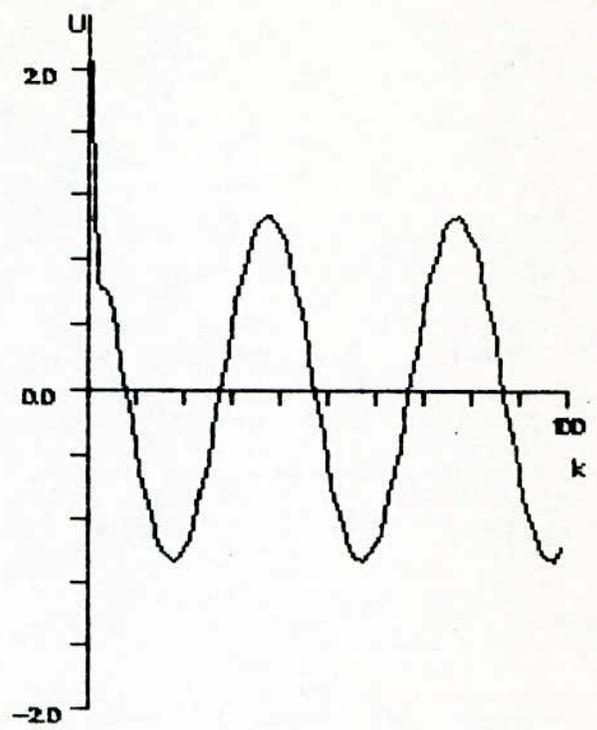
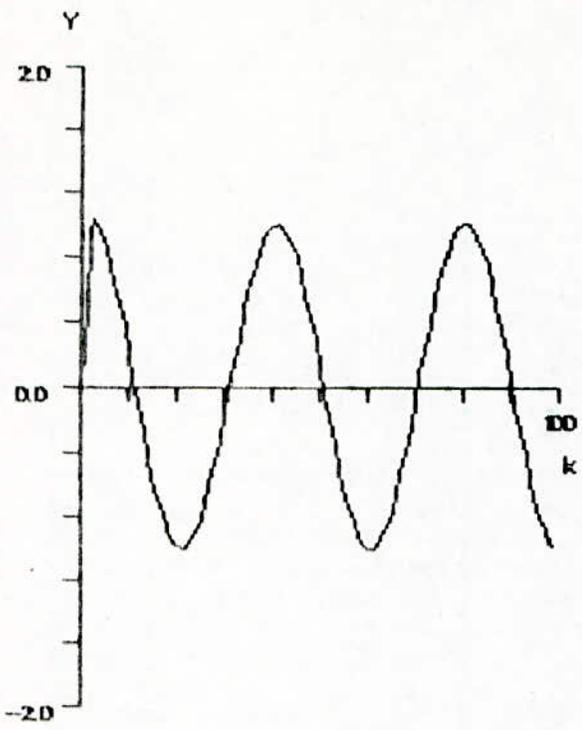


Fig 1.9: Reponse à une consigne cosinusoidale

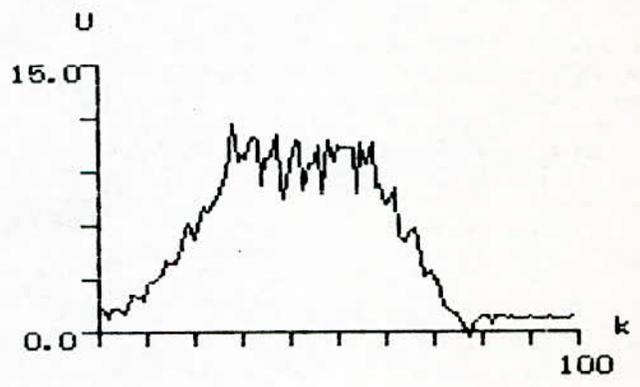
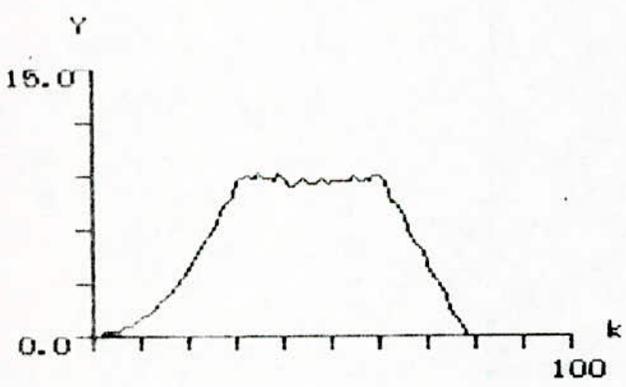


Fig 1.10: Reponse à consigne trapésoidale

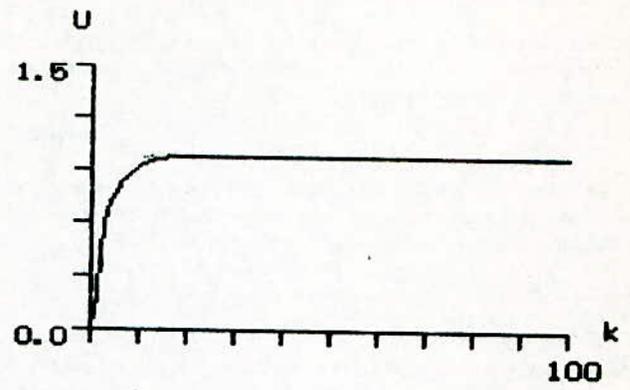
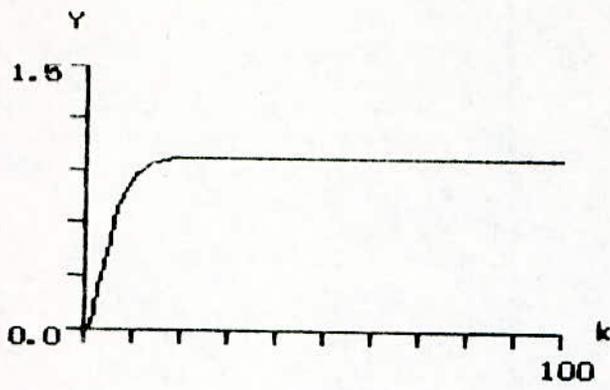


Figure A

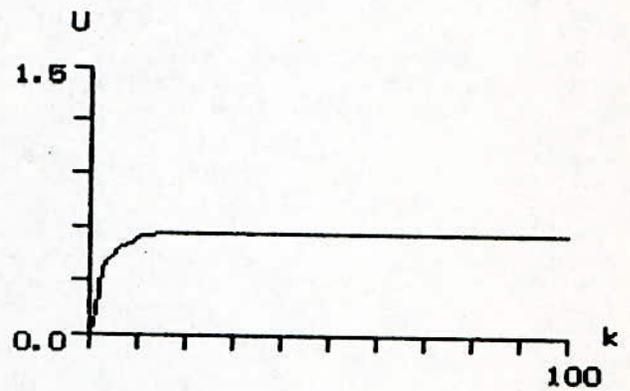
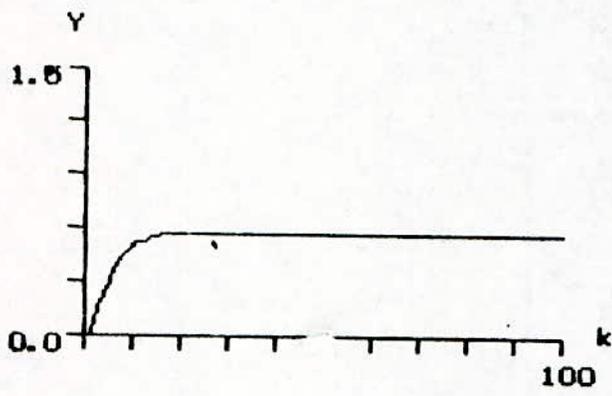


Figure B

Fig II.1: Reponse à un échelon de consigne

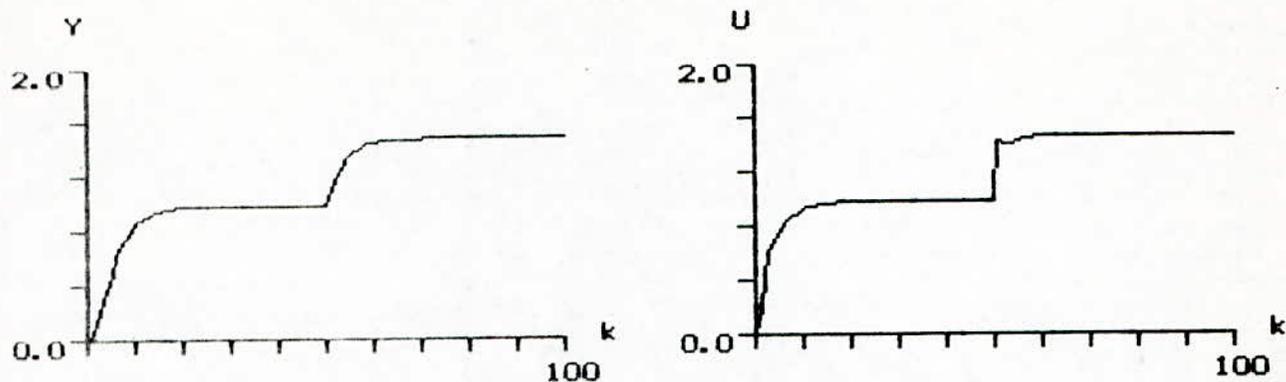


Fig II.2: Reponse à un changement de consigne

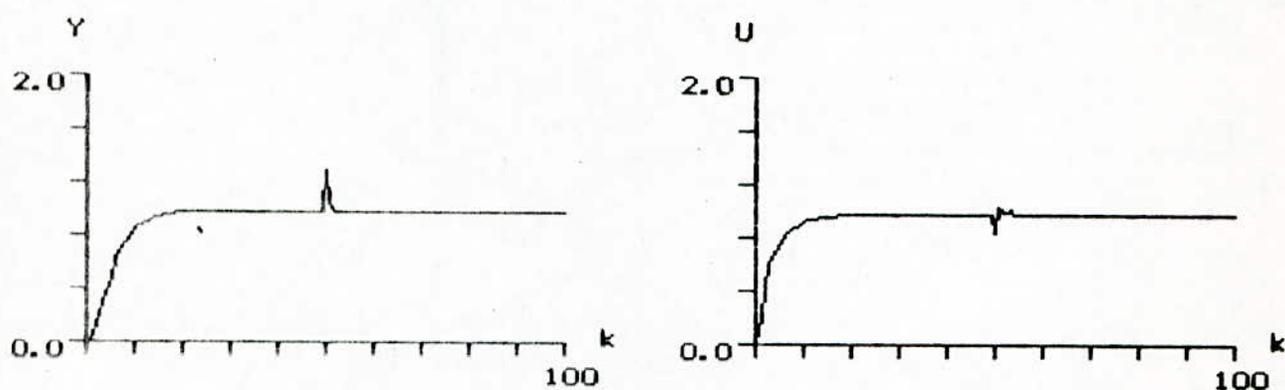


Fig II.3: Reponse à un échelon avec perturbation fugitive

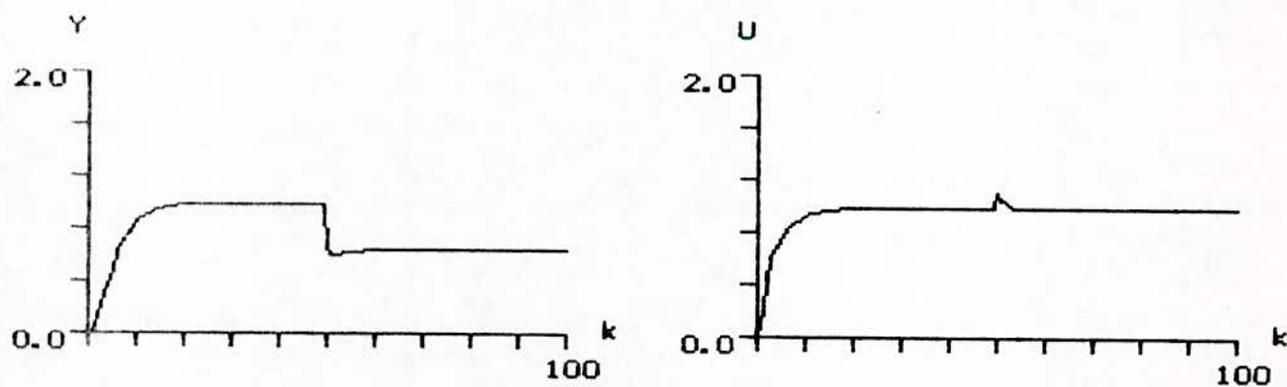


Fig II.4: Reponse à un échelon avec perturbation constante

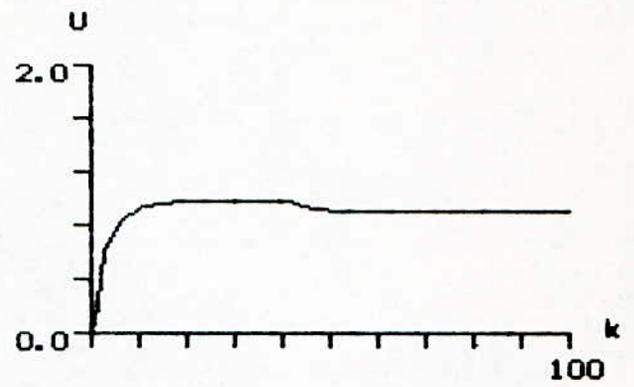
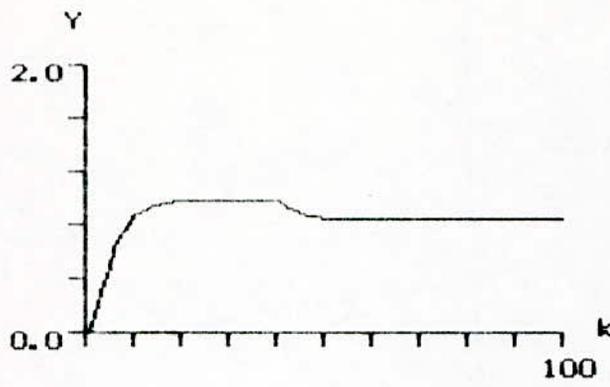


Fig II.5: Reponse à un échelon avec changement des paramètres du système

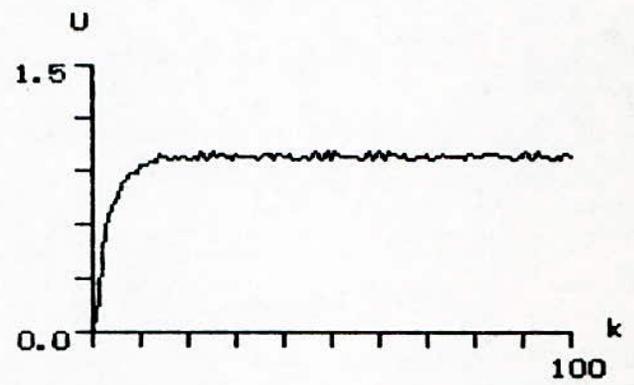
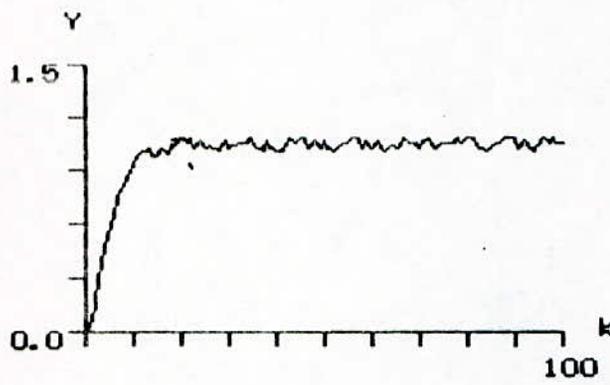


Fig II.6: Reponse à un échelon de consigne avec bruit blanc

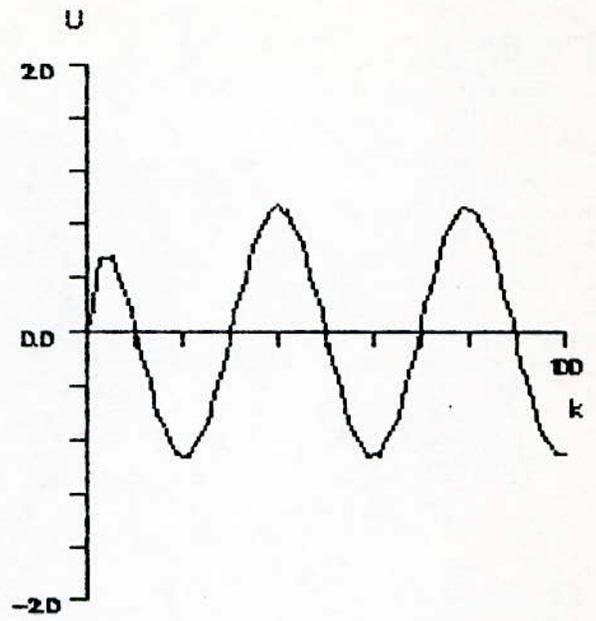
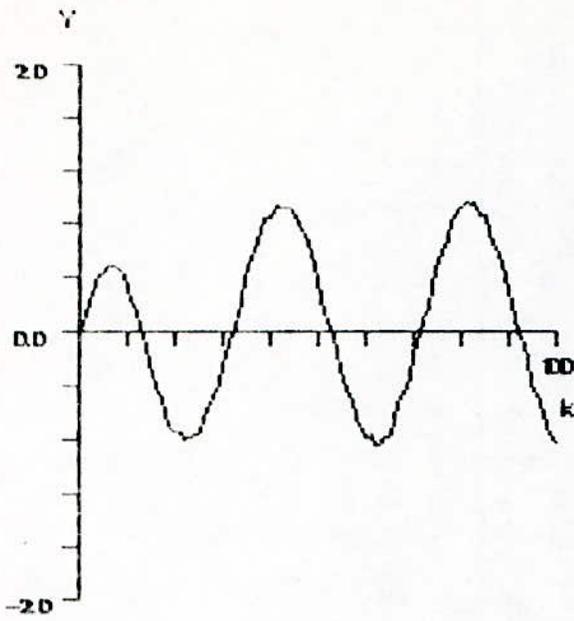


Fig II.7: Reponse à consigne sinusoidal

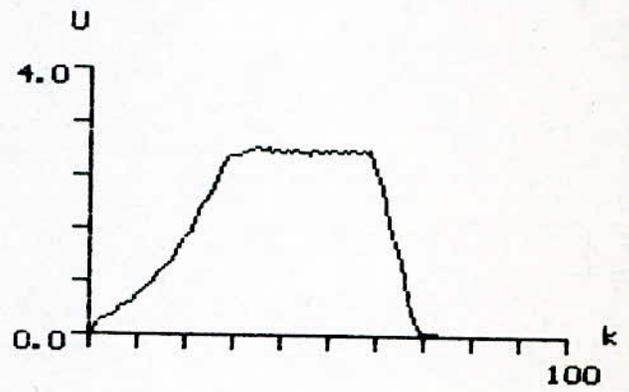
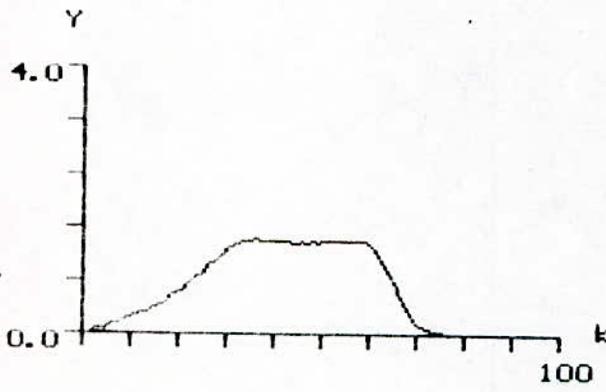


Fig II.8: Reponse à consigne trapésoidale

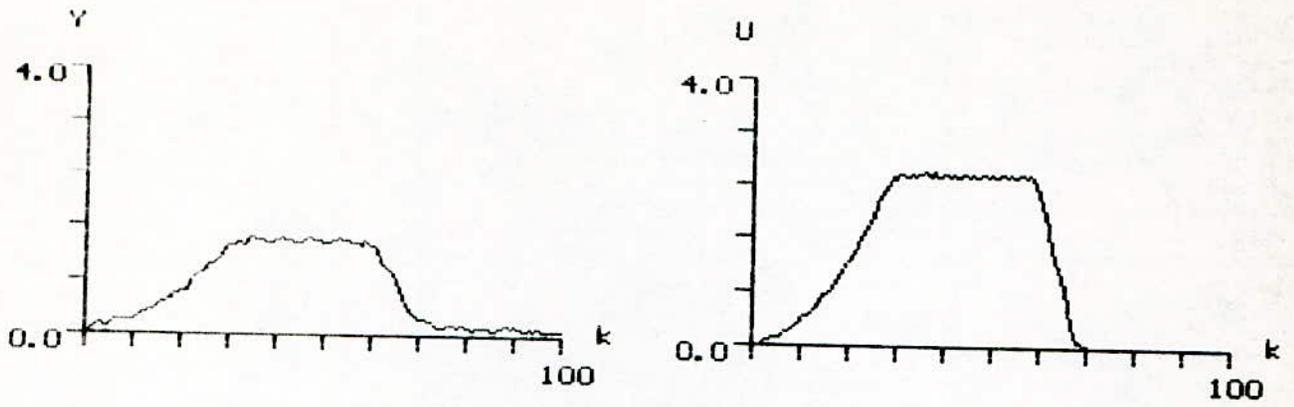


Fig II.9: Reponse à consigne trapésoïdale avec paramètres perturbés

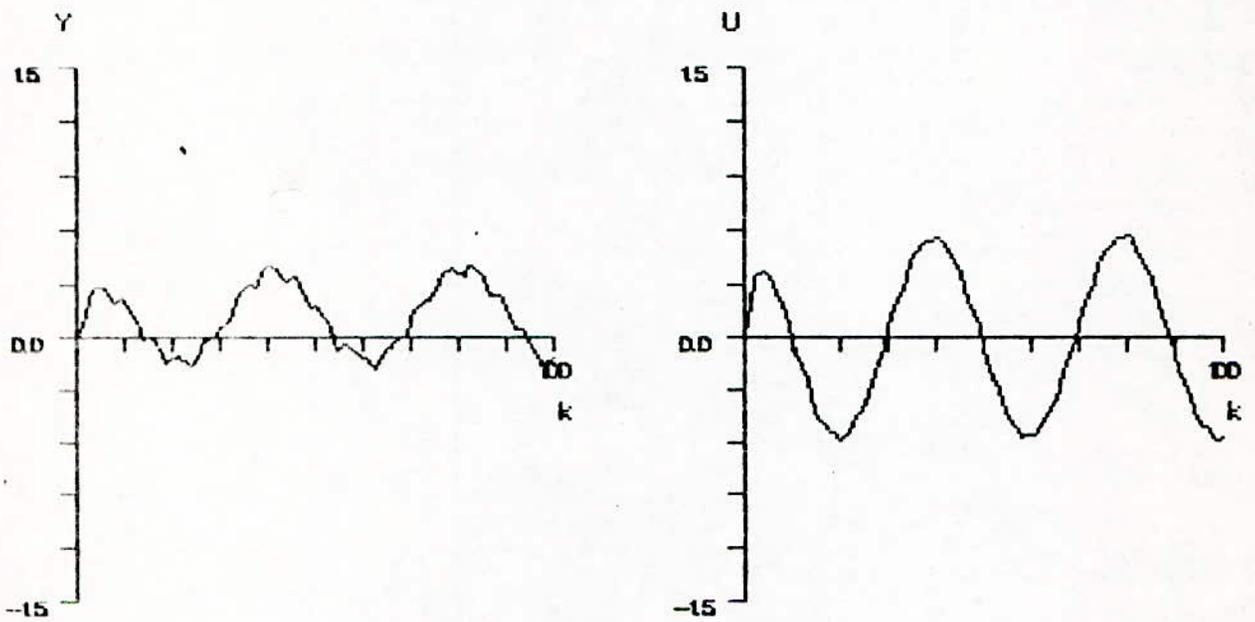


Fig II.10: Reponse à une consigne cosinusoidal avec paramètres perturbés

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

## Conclusion

Le domaine de la commande adaptative est assez large. Nous nous sommes penché, dans ce travail à l'étude d'un cas très intéressant qui est la commande adaptative dans l'espace d'état, objet de la plupart des recherches qui se font actuellement dans le domaine de l'automatique.

Nous avons, dans une première étape, présenté dans notre travail, les concepts généraux de la commande adaptative. Cette étape a servi d'introduction pour présenter et développer les algorithmes de la commande adaptative dans l'espace d'état.

Dans la deuxième partie; deux schémas de commande adaptative ont été examinés:

1) Schéma en boucle ouverte : nous avons adopté le principe de placement de pôles pour calculer le retour d'état approprié, pour présenter l'adaptation programmée dans l'espace d'état, cette technique consiste à calculer préalablement les coefficients de réglage et les stocker dans le bloc d'adaptation. Elle nécessite néanmoins une bonne connaissance du système et de l'environnement, donc de la relation qui relie les deux. Cette condition, qui n'est dans le cas réel pas vérifiée, représente un inconvénient majeur pour l'application de cette méthode. Toutefois, elle donne de très bons résultats lorsque ces conditions sont vérifiées.

2) Schéma en boucle fermée: nous avons considéré deux approches:

a) l'approche directe: qui consiste à estimer directement les paramètres du régulateur, elle permet de réduire de façon considérable le temps de calcul. La commande autoadaptative est l'exemple le plus connu de cette approche.

b) l'approche indirecte: qui consiste à estimer d'abord les paramètres du procédé pour ensuite calculer les paramètres du régulateur en fonction de ces estimations.

D'un point de vue historique, les schémas en boucle ouverte ont été les premiers à être utilisés. Ces schémas assurent une commande hors ligne. Le développement des

calculateurs numériques a permet aux chercheurs de se pencher vers les schémas en boucle fermée qui assurent une commande en temps réel beaucoup plus intéressante. Cette dernière permet de prendre en considération le système durant son évolution.

notre contribution a porté sur la mise en évidence le bloc d'adaptation qui permet de calculer les coefficients de réglage et donner la commande nécessaire, suivant la stratégie adoptée. Deux sortes de stratégies ont été considéré :

- placement de pôles en boucle fermée.
- minimisation d'un critère quadratique.

Dans ce but, nous avons utilisé la structure de réglage d'état présentée dans [7] et l'étendre au cas adaptatif.

La première stratégie nous a permis de développer une technique d'adaptation programmée. La seconde nous a permis de développer une technique de commande autoadaptative.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer quelques conclusions concernant ces deux méthodes. Dans le cas de l'adaptation programmée, la connaissance a priori du système à commander est nécessaire. Il faut encore s'assurer que les relations entre le système et l'environnement ne change pas de façon imprévue, ce qui n'est pas le cas réellement. la commande autoadaptative, par minimisation d'un critère quadratique permet de commander le système en temps réel. Cet avantage est malheureusement limité par la condition que la variation doit être borné et petite et la bonne connaissance du système à commander.

### **perspectives**

Dans les deux stratégie considérées, nous nous somme penché sur un cas très particulier c'est le cas ou les paramètres du système sont liés à l'environnement par des relations régides. En plus, les états du système sont accessibles, nous n'avions donc pas besoins d'utiliser un estimateur de paramètres ni un observateur d'état (ceci n'étant pas l'objet de notre travail).

Toutefois, il serait très intéressant de remplacer, dans la structure de réglage d'état utilisé, le bloc contenant les

relations liant l'environnement aux paramètres du procédé, par un estimateur de paramètres et un estimateur d'état adaptatif. Cette nouvelle structure permet de réaliser une commande en temps réel, qui a l'avantage de ne pas exiger la connaissance du système, qui peut avoir des états non accessibles.

L'étude de la commande adaptative dans l'espace d'état avec observateur d'état et un estimateur de paramètres dans le cas de la boucle fermée, constitue pour nous un domaine très vaste d'étude, surtout dans le cas de la commande en ligne qui présente l'avantage de bien suivre l'évolution du système, mais ces algorithmes sont en général très compliqués.

---

*Bibliographie*

### Revues:

- [1] P.G.RIEDO " Adaptation continue des coefficients de réglage." bulletin A.S.S.P.A (1986)
- [2] M.M.KRAUSET " PID autoadaptative." revue mesures : techniques d'application du 24 juin 1984.
- [3] P.BERDILLON " Control de processus: quand le régulateur s'autoadapte." revue mesures: techniques d'application du 7 octobre 1985.
- [4] H.M.SILVIERA " Une nouvelle méthode pour la  
I.D.LANDAU synthèse des systèmes adaptatifs avec modèle de référence." -revue R.A.I.R.O automatique/systems analysis and control. vol 13 n:1 (1979)

### theses

- [5] J.BORDENEUVE.GUIBE " Commande prédictive adaptative: Application à des procédés thermiques." -thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier (Toulouse). option automatique (1990)
- [6] A.GAUTHIER " Identification récurrente des systèmes M.E.M.S" -thèse de doctorat 3 cycle (automatique).Ecole nationale polytechnique de GRENOBLE (1977)

### OUVRAGES:

- [7] H.BUHLER " Reglage échantillonnés: Traitement dans l'espace d'état. " Presses Polytechnique Romandes (1983)
- [8] H.BUHLER " Conception de système automatiques." Presses Polytechnique Romandes (1988)
- [9] FARGEON " Commande numérique des systèmes ." ED: MASSON (1986)
- [10] C.FOULARD " Commande et régulation par  
S.P.SANDARZ calculateur numériques."  
S.GENTIL EYROLLES (1977)
- [11] FOSSARD " Commande des systèmes multitidimensionnels." DUNOD paris (1972)
- [12] C.J.HARRIS " self tuning and adaptive control:  
S.A BILLINGS theory and application. " Institut of electical Engineers. British library cataloguing in publication data (1985)

- [13] I.D.LANDAU " Commande adaptative: Aspects théoriques et pratique." MASSON (1986)
- [14] I.D.LANDAU " Adaptive control: Model référence approche." MARCEL Dekker (1979)
- [15] I.D.LANDAU " Identification et commande des systèmes." HERMES (1988)
- [16] K.NADJIM " Commande adaptative des processus industrielles." MASSON (1980)

programmation:

- [17] J.C.ARMICI " Turbo pascal version 4."  
ED: LISA (1986)