

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

6/96

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique

*Ecole Nationale Polytechnique d'Alger*

Département: Génie Electrique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Projet de Fin d'Etude*

En Vue de l'Obtention du Diplôme: d'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème

**Commande prédictive  
généralisée**

**Application à un Modèle Non Linéaire d'un Réacteur  
Nucléaire Type PWR**

Etudié par:

Mr: Boukhari BENGHEZAL

Proposé et dirigé par:

Mr: K. DJEBARA

En collaboration avec:

Mr: M.S. BOUCHRIT

Promotion: Juin 1996

ENP 10 Avenue Hacén Badi, EL Harach; Alger

*Je dédie ce travail*

*A ma chère mère*

*A toute ma famille*

*Et à tous mes amis les plus chers*

*Boukhari.*

## AVANT PROPOS

*Cette thèse a été préparée au sein du Laboratoire d'Automatique au DIC(Département Instrumentation et Contrôle) du CDSE (Centre de Développement des Systèmes Energétiques) d'Ain-Oussara.*

*Je voudrai particulièrement exprimer ma reconnaissance à monsieur K.Djebara, attaché de recherche au sein du laboratoire d'Automatique, pour ses encouragements, ses conseils et ses propositions qui ont guidé à bien mon travail.*

*Je tiens à remercier également monsieur M.S. Bouchrit Docteur à l'Ecole National Polytechnique D'Alger pour son aide et ses encouragements.*

*Mes remerciements vont aussi à Messieurs : F.Saouker, A.Berrahal, T.Saib, M.F.Belazreg et R. B. Bouyadjra (Ingénieurs au D.I.C) pour leurs disponibilités à mon égard.*

*Que tous mes professeurs du département Automatique de L'E.N.P en soient vivement remerciés pour leurs efforts durant tout mon cursus pédagogique au sein de l'Institut.*

*Je remercie vivement T.Benali, M.Zerouki, M.Bennaceur, A.Sedir, L.Mactouf, L.Rais, A.Mihoubi, A.Bensmail et M.Bouaziz Pour leur soutien et leurs encouragements.*

*Je ne saurai oublier dans mes remerciement tous les membres de ma famille et mes amies les plus chers.*

# TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE I MODELISATION D'UNE CENTRALE NUCLAIRE</b>	
I.1. INTRODUCTION .....	2
I.2. DESCRIPTION DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	3
I.2.1. Circuit Primaire.....	3
I.2.2. Circuit Secondaire.....	6
I.2.3. Barres De Contrôle.....	7
I.3. MODELE DU REACTEUR.....	8
I.3.1. Modèle Neutronique.....	8
I.3.2. Equations Cinétiques.....	11
I.3.3. Modèle Thermique.....	13
<b>CHAPITRE II COMMANDE ADAPTATIVE</b>	
II.1. COMMANDE ADAPTATIVE.....	18
II.1.1. Introduction.....	18
II.1.2. Commande Adaptative Avec Modèle De Référence.....	18
II.1.3. Réglage Auto-Ajustable.....	19
II.2. ESTIMATION DES PARAMETRES.....	21
II.2.1. Introduction.....	21
II.2.2. Les Structures Des Modèles.....	22
II.2.3. Type Du Modèle Utilise.....	23
II.2.4. Estimation Robuste Des Paramètres.....	24
II.2.5. Algorithme D'adaptation Paramétriques (A.A.P.).....	25
<b>CHAPITRE III ALGORITHMES DE COMMANDE</b>	
III.1. REGULATEUR NUMERIQUE P.I.D. ....	29
III.1.1. Linéarisation Du Système .....	29
III.1.2. Régulation P.I.D.....	31
III.1.3. Détermination De K, T <sub>i</sub> , T <sub>d</sub> .....	32
III.2. COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE G.P.C. ....	33
III.2.1. Introduction.....	33
III.2.2. Représentation Du Procédé Par Un Modèle CARIMA Et Prédiction De La Sortie.....	34
III.2.3. Récurrence De L'équation De Diophantine.....	36
III.2.4. Objectif De La Commande.....	37

III.2.5. Calcul Du Prédicteur à j-Pas.....	38
III.2.6. Minimisation Du Critère Et Calcul De La Loi De Commando . .....	39
III.2.7. Eléments De Synthèse.....	40
III.2.8. Algorithme De Commande Adaptative.....	42

## CHAPITRE IV INTERPRETATION DES RESULTATS

VI.1. INTRODUCTION.....	44
VI.2. SIMULATION EN BOUCLE OUVERTE.....	44
VI.3. COMMANDE PAR PID.....	48
VI.4. COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE.....	51
VI.4.1. Initialisation.....	51
VI.4.2. Application Sur Un Modèle Linéaire.....	52
VI.4.3. Application Sur Le Modèle Du Réacteur.....	59
 CONCLUSION GENERALE.....	 78
 ANNEXES.....	 80
 REFERENCES.....	 82



## INTRODUCTION GENERALE

**D**epuis quelques années, on note d'importants progrès dans la commande des centrales nucléaires, notamment la synthèse de lois de commande adaptatives pour des centrales nucléaires de type PWR 900 MW.

La puissance d'un réacteur nucléaire peut être ajustée par un positionnement approprié de ses barres de contrôles. L'objectif est de maintenir la température de l'eau primaire à une valeur désirée et ceci grâce au pilotage des barres de contrôle.

La motivation principale de la commande adaptative est d'obtenir un réajustement automatique des paramètres de l'organe de commande de manière à pallier l'effet des perturbations sur les variables à réguler. Le but de la présente étude est la mise en oeuvre de méthodes modernes issues de récents développements de la commande adaptative pour le contrôle de la température d'un réacteur nucléaire type P.W.R 900Mwe. Il s'agit de la commande prédictive généralisée (G.P.C) comparée à la commande conventionnelle type (P.I.D).

L'étude sera menée selon les points suivants :

- Après généralités sur les centrales nucléaires à eaux pressurisée, le premier chapitre décrit les différents organes qui les constituent et élabore le modèle d'un réacteur type P.W.R 900Mwe.
- Le deuxième chapitre, présente une introduction à la commande adaptative, avec ses différentes techniques on y trouve aussi l'estimation des paramètres et l'algorithme d'adaptation paramétrique.
- Les algorithmes de commande qui sont le P.I.D et le G.P.C seront détaillés dans le troisième chapitre.
- Nous présenterons dans le dernier chapitre les résultats de simulation en boucle ouverte et chaque algorithme de commande avec interprétation des résultats obtenus.

En fin quelques remarques et perspectives en guise de conclusions terminerons ce mémoire.

# CHARPITRE I

## **1.1) INTRODUCTION:**

Les centrales nucléaires sont destinées généralement à la production d'électricité et quelques rares fois, à la production de la chaleur utilisée directement dans l'industrie, mais ce sont toutes des centrales thermiques quelque soient leurs différences techniques .

Un grand nombre de ces centrales emploient de l'eau ordinaire sans pression comme modérateur et comme fluide caloporteur. Ce sont des centrales dites PWR (pressurised water reactor).

Les différences essentielles que l'on trouve entre les divers types de centrales nucléaires portent sur le réacteur: c'est-à-dire que le choix du combustible nucléaire ou bien la manière dont on va produire de la chaleur, déterminent pratiquement les matériaux et les équipements qu'on emploiera .

Le combustible nucléaire le plus utilisé est l'uranium, l'énergie thermique étant produite par la fission de l'isotope 235 qui se trouve dans la proportion de 0.7% dans l'uranium naturel.

Il y a donc deux possibilités: employer de l'uranium naturel ou bien légèrement enrichi en isotope 235 .

Ce dernier cas est le plus utilisé ces dernières années, car il permet d'utiliser de l'eau ordinaire comme modérateur et fluide réfrigérant .

L'originalité des centrales à eau pressurisée (PWR) réside dans le fait qu'elles comportent deux circuits d'eau sous pression séparés.

Dans les centrales à eau bouillante (BWR), on trouve également de l'eau sous pression, mais un seul circuit et, en cas d'accident au niveau du coeur, les produits de fission peuvent passer dans l'eau, polluant ainsi tous les éléments du circuit.



## I-2) DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

L'énergie produite par fission des atomes de l'uranium subit trois transformations:

- Transformation thermique (production de la vapeur).
- Transformation mécanique (entraînement de la turbine).
- production de l'électricité (entraînement de l'alternateur).

Une centrale nucléaire type PWR 900 MWE (figure (I.1)), utilise l'oxyde d'uranium  $UO_2$  légèrement enrichi (environ 3% de  $U^{235}$ ) comme combustible et l'eau ordinaire comme caloporteur et modérateur.

### I.2.1) LE CIRCUIT PRIMAIRE:

Le circuit primaire est le circuit de refroidissement du combustible, il contient l'eau primaire qui transporte la chaleur produite par les éléments combustibles à l'eau du circuit secondaire qui est vaporisée.

Il comprend trois boucles de refroidissement branchées en parallèle sur la cuve du réacteur (pour une puissance de 900 MWe).

Sur une des boucles est branché le pressuriseur qui contrôle des variations de pression et de volume du fluide primaire.

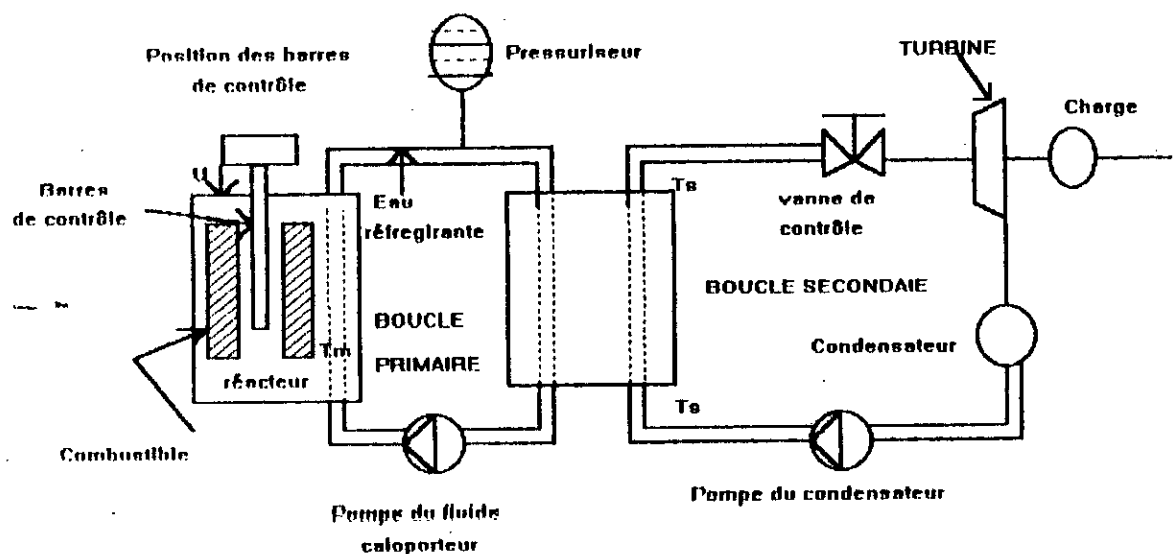


Figure (I.1) Schéma du réacteur PWR

**La cuve:**

La cuve du réacteur est conçue pour:

- Contenir et soutenir le coeur, les pièces intérieures et les mécanismes de commande des barres de contrôle.
- Assurer une parfaite étanchéité et une résistance suffisante à la pression interne.
- Contribuer à la protection neutronique et biologique.

**Le coeur:**

Il constitue le siège de la réaction en chaîne contrôlée.

Il est formé de 157 assemblages combustibles, de 264 crayons combustibles chacun. 24 tubes guidés destinés à recevoir les grappes de contrôle et un tube central servant de canal à l'instrumentation interne du coeur.

Le fluide caloporteur, l'eau légère à la pression 155 bars, descend le long de la cuve puis elle sera reparti à la base des assemblages.

Il remonte le long des assemblages qui sont ainsi refroidis.

**Les équipements internes de la cuve:**

Ces équipements en acier inoxydable ont pour rôles essentiels:

- De supporter le combustible du coeur.
- De conduire d'eau primaire des entrées froides aux sorties chaudes en la répartissant convenablement sur les éléments combustibles.
- De guider les grappes de contrôle et l'instrumentation.

**Les mécanismes de commande des grappes de contrôle:**

Les grappes de contrôle sont constituées chacune d'un faisceau de 24 éléments absorbants de neutrons, tenus à leurs extrémité supérieure par les bras d'une sorte d'étoile multibranche.

Chacune des 53 grappes de contrôle est fixée à une tige de commande que

les mécanismes vont manoeuvrer en la poussant pas à pas dans le sens de la montée ou de la descente à l'aide d'un système de grappins qui s'appuient sur des gorges de la tige de commande. Ces grappins sont contenus dans des cartes étanches. Ils contiennent de l'eau chaude sous pression. A l'extérieur de chaque carte sont enfilées 3 bobines magnétiques qui actionnent les grappins suivants un programme donné.

**Pressuriseur:**

Le pressuriseur est un cylindre vertical équipé de 78 résistances électriques qui sont répartis en 3 groupes. 2 groupes sont fixes et alimentés en tension constante et un groupe réglable prévu pour permettre la régulation.

**Les générateurs de vapeur:**

Chaque boucle du réacteur comporte un générateur de vapeur qui est un vaporisateur tubulaire à circulation naturelle avec séchage mécanique de la vapeur.

L'eau est injecté du bas du canal de descente où elle s'écoulera entre les turbos, l'eau primaire entre dans des tubes en U inversés, à une température en régime nominal de 302°C, cède une partie de sa chaleur et ressort des tubes à 285°C. La puissance ainsi cédée est 900 MW. A la sortie du faisceau de tubes, le mélange passe dans trois gros séparateurs mécaniques à cyclone. Par la centrifugation, l'eau et la vapeur sont séparées.

L'eau retombe dans la chambre d'alimentation et la vapeur séchée pour améliorer sa qualité. Les sécheurs envoient la vapeur dans le dôme où elle sera stockée avant d'être envoyé au barillet.

La vapeur délivrée est de la vapeur saturée contenant moins de 0,25% d'humidité qui sert à alimenter la turbine.

## **I . 2. 2) LE CIRCUIT SECONDAIRE:**

Le rôle du circuit secondaire est de convertir l'énergie thermique produite dans le coeur en énergie électrique.

### **Turbine:**

Sa fonction est d'assurer la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique, de manière à assurer en toutes circonstances la rotation à une vitesse pratiquement constante ( 1500 tr /mn ), de l'alternateur principal et de son excitatrice.

### **Circuit de by-pass au condenseur et de décharge à l'atmosphère:**

Les circuits de décharges de vapeur vive à l'atmosphère et du condenseur permettent d'éliminer la chaleur résiduelle produite par la chaudière nucléaire ainsi que l'énergie contenue dans le circuit primaire après un arrêt d'urgence du réacteur sans avoir recours aux pompes de sécurité des générateurs de vapeur.

Les trois lignes de vapeurs issues des trois GV sont réunies dans un barillet qui est suivi de la vanne d'admission turbine. La vapeur est donc envoyée dans le corps haute pression (HP) où elle se détend provoquant ainsi la rotation de la turbine.

La chute de pression s'accompagne d'un abaissement du titre de vapeur, la vapeur sortant de l'étage ( HP ) passera dans un séchoir surchauffeur avant d'être admise à l'étage basse pression ( BP ).

Le condenseur échange les dernières calories de la vapeur avec l'eau de refroidissement. A l'intérieur du condenseur , l'eau secondaire est à une température très basse comprise entre 20 et 30 ° c. A fin de pouvoir retourner cette eau pour alimenter les GV, il faut la réchauffer puis relever sa pression grâce à des turbopompes.

### **1.2.3) BARRES DE CONTROLE:**

#### **a)- Introduction:**

Si on amène un réacteur en le faisant diverger et en le stabilisant au moyen des barres de contrôles pour rendre son coefficient de multiplication égal à 1, le réacteur ne restera pas de lui même dans cette situation; Il faudra "piloter" ce réacteur pour compenser les différentes effet qui se manifesteront pendant la marche en puissance. Ces effets sont:

1°/ Le réacteur s'empoisonnera par une partie des produits de fission dont certains ont des section efficaces d'absorption considérables.

2°/ En produisant de l'énergie, on "brûlera" de l'uranium, on perdra donc de la réactivité.

3°/ Si dans le réacteur sont présents des corps qui sous l'effet des neutrons produisent des corps fissiles, on regagnera de la réactivité.

4°/ Entre le réacteur en fonctionnement et à l'arrêt, l'augmentation de température du combustible et du modérateur modifiera les propriétés neutroniques et physiques du réacteur, d'où les conséquences sur la réactivité.

Ces différents effets sur la réactivité seront compensés à l'aide des barres de contrôle absorbantes aux neutrons, ou même à l'aide d'un poison dissous dans le modérateur et dont on modifiera la concentration.

#### **b) description des barres de contrôle:**

Dans un réacteur, pour compenser les effets de température, d'empoisonnement et d'usure de combustible, il est nécessaire de prévoir au début de chaque cycle de fonctionnement une certaine quantité de réactivité par la présence d'un excédent d'uranium. Cet excès de réactivité doit être compensé par la présence de barres de contrôle absorbantes.

A l'arrêt du réacteur, les barres sont complètement enfoncées dans le coeur.

En général cet excédent servira à compenser l'antiréactivité due aux

effets de température, d'empoisonnement et d'usure du combustible. pour compenser ces effets, les barres peuvent être montées soit en rideau, soit une par une.

Suivant la fonction à laquelle on les destine, les barres peuvent avoir les dénominations suivantes:

- barres de sécurité;
- barres de compensation ;
- barres de pilotage.

L'enfoncement d'une barre de contrôle dans un réacteur provoque les deux effets suivantes:

- absorption des neutrons au niveau de la barre;
- modification de la répartition de flux dans le coeur avec augmentation des fuites.

Dans un PWR, les barres sont divisées en 6 groupes de 8 grappes et 5 autres grappes.

- 2 groupes de 8 grappes de sécurité;
- 4 groupes de 8 grappes de contrôle;
- 5 grappes courtes servant à limiter les oscillations spatiales Xénon et les pics de puissance.

### **I.3) MODELE DU REACTEUR:**

#### **I.3.1) MODELE NEUTRONIQUE:**

##### **I.3.1.1) Rappel sur la neutronique:**

Les équations cinétiques du modèle du réacteur peuvent être obtenu à partir du phénomène de la fission nucléaire.

##### **a)- La fission:**

Quand un neutron est absorbé par un noyau fissile ( $U^{235}$  par exemple), ce dernier se transforme en noyau instable qui se scinde en deux noyaux avec émission de 2 à 3 neutrons avec dégagement d'une énergie très importante (

autour de 200 Mev). Ce type d'interaction particulier neutron-noyau est appelé réaction de fission.

**b)- Réaction en chaîne :(figure 1.2)**

Les neutrons émis au moment de la fission se situent dans une bande d'énergie centrée sur 2Mev. Le niveau d'énergie moyen des noyaux de la matière à une température de 20°C se situe autour de 0,025 ev. C'est pour cela que ces neutrons sont appelés neutrons thermiques.

A ce niveau d'énergie, la probabilité d'être absorbée par un noyau d' $U^{235}$  est très grande .

Donc si au moins un neutron émis au cours de la fission, en perdant de l'énergie, arrive à devenir un neutron thermique, il pourra provoquer une nouvelle fission d'un noyau d'uranium 235 et le cycle recommence.

C'est pour cela que cette réaction est appelée réaction en chaîne.

Finalement le modérateur à un double rôle, il maintient la réaction en chaîne en ralentissant les neutrons, c-à-d les transforme en neutrons thermiques et transforme l'énergie nucléaire en énergie thermique.

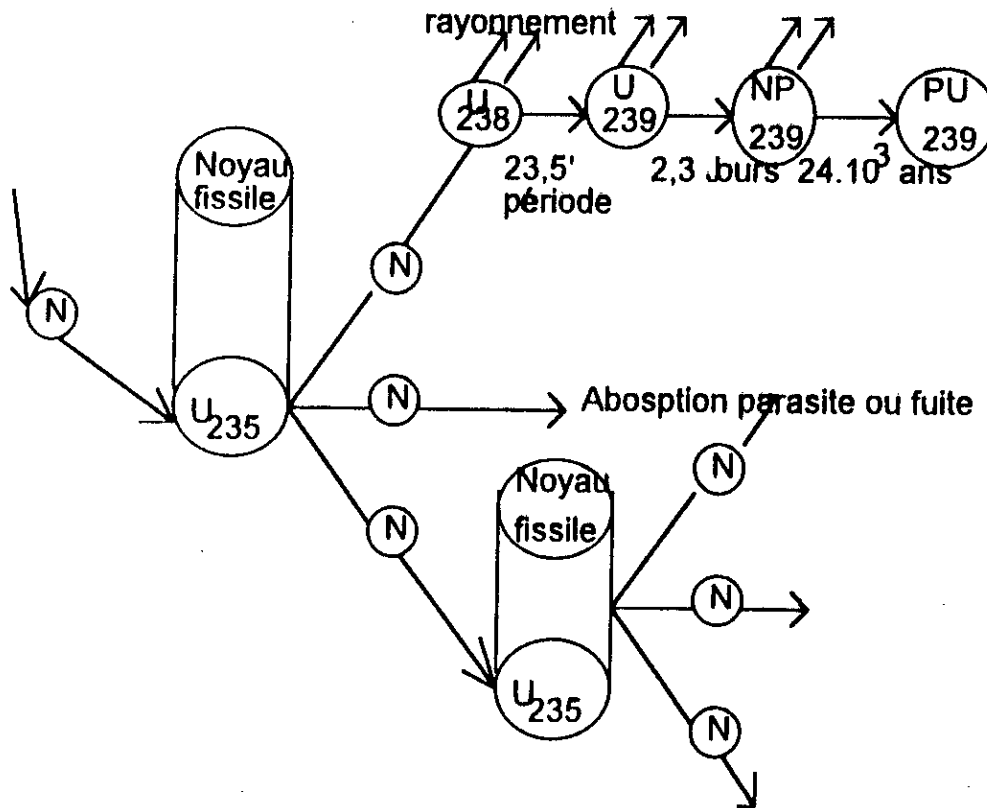


Fig 1.2. Schéma simplifié de la fission du noyau  $U^{235}$ .

**c)- Puissance neutronique:**

La fission d'un atome d'uranium 235 libère en moyenne une énergie de 200 Mev. La fission de tous les noyaux des atomes contenus dans 1g d' $U^{235}$  en 24 heures, correspond à une puissance libérée de  $0,97 \cdot 10^6$  W.

**d)- Notion de la réactivité:**

Le nombre de neutrons varie d'une génération à l'autre après que le phénomène de fission a lieu. Un facteur  $k$  peut être défini comme le rapport de la génération précédente, il permet de dire dans quel sens évolue la réaction en chaîne. On distingue trois cas:

-Etat sous critique:  $0 < k < 1$ , De génération en génération, le nombre de neutron diminue, la réaction s'arrête.

-Etat critique:  $k=1$ , Le nombre de neutrons reste constant, la réaction en chaîne est stable.



-Etat sur critique: Le nombre de neutrons ne cesse de croître, la réaction en chaîne diverge.

On définit la réactivité '  $\rho$  ' par la formule suivante:

$$\rho = k-1/k$$

Dans le fonctionnement normal d'un réacteur,  $k$  est voisin de 1.

D'où:  $\rho \approx k-1$

### e)- Neutrons prompts et neutrons retardés:

Les neutrons libérés à chaque fission sont classés en neutrons prompts et neutrons retardés. Ces neutrons prompts sont émis instantanément au moment de la fission (autour de 99%). Le reste (~1%) des neutrons est émis après un retard pouvant atteindre plusieurs dizaines de secondes, ce sont les neutrons retardés émis lors de la désintégration des produits de fissions obtenus.

On définit le facteur  $\beta$  comme la fraction des neutrons retardés par rapport à tout les neutrons émis (pour l' $U^{235}$ ,  $\beta = 0,07606 = 706,6$  pcm).

On classe généralement en six catégories les différents types de noyaux radioactifs issus de la fission, appelés noyaux précurseurs parce que chacun de ces noyaux, en se désintégrant, est à l'origine de l'émission d'un neutron retardé.

Chaque groupe de neutrons retardés est caractérisé par:

$$\beta_i = \frac{\text{Fraction émise à partir des noyaux précurseurs (i)}}{\text{fraction totale}}$$

on a donc: 
$$\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta$$

### 1.3.2) EQUATIONS CINÉTIQUES:

Soit  $\theta$  la durée de vie d'une génération de neutrons (le temps qui s'écoule en moyenne entre sa naissance par fission et sa disparition donnant

lieu à une nouvelle fission) et 'N' le nombre de neutrons de la génération à l'instant 't', la nouvelle génération sera caractérisée, après un temps  $\theta$  par:  $kN(t) (1-\beta)$  neutrons prompts.

En posant:  $\lambda_i$ : Probabilité de désintégration des noyaux précurseurs 'i'

$C_i(t)$ : Nombre de noyaux précurseurs (i) à l'instant t.

$\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \theta$ : Nombre de noyaux précurseurs qui se sont désintégrés pendant

le temps  $\theta$  égale au nombre des noyaux retardés apparus pendant  $\theta$ .

$kN(t)\beta_i$ : Nombre de noyaux fissiles 'i' apparus lors des désintégrations des noyaux fissiles, pendant le temps  $\theta$ .

$$N(t + \theta) = kN(t)(1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \theta \quad (1.1)$$

$$C_i(t + \theta) = C_i(t) - \lambda_i C_i(t) \theta + N(t) k \beta_i \quad (1.2)$$

En passant à la limite on trouve:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{P - \beta}{\theta} N(t) + \sum_{i=1}^6 C_i(t) \quad (1.3)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{N(t)}{\theta} \beta_i - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1.4)$$

Ces équations décrivant l'évolution d'un nombre de neutrons. Compte tenu de ces deux équations et du fait que la puissance nucléaire est proportionnelle à la densité neutronique les équations cinétiques retenues sont:

$$\frac{dPn(t)}{dt} = \frac{P - \beta}{\theta} Pn(t) + \sum_{i=1}^6 C_i(t) \lambda_i \quad (1.5)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} Pn(t) - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1.6)$$

L'équation définissant la réactivité  $\rho$  est:

$$\rho = \rho_0 - \alpha_u (T_u - T_{u0}) - \alpha_m (T_m - T_{m0}) \quad (1.7)$$

$\rho_B$ : réactivité des barres de contrôles;

$\alpha_C$ : coefficient DOPPLER (l'échauffement du combustible);

$\alpha_m$ : coefficient modérateur;

$T_u$ : température d'uranium;

$T_{u0}$ : valeur nominale de la température du combustible;

$T_m$ : température du modérateur;

$T_{m0}$ : valeur nominale de la température de modérateur.

### 1.3.3) MODELE THERMIQUE:

L'énergie générée au sein du crayon combustible migre à travers celui-ci, cette énergie est transmise au modérateur par l'intermédiaire de la gaine.

La variation de l'énergie d'un milieu = énergie produite - transfert.

On peut en déduire que le transfert thermique dans le coeur est caractérisé par la variation de l'énergie dans le combustible, puis la variation de l'énergie dans la gaine et enfin la variation de l'énergie dans le modérateur.

La variation de l'énergie dans le combustible est égale à l'énergie nucléaire par la fission au sein de l'uranium diminuée de l'énergie transmise par conduction à la gaine qui l'entoure.

D'où:

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = KP_n - \frac{1}{R_{uq}} (T_u - T_g) \quad (1.8)$$

La variation de l'énergie dans la gaine est égale à l'énergie cédée par le combustible à la gaine diminuée de l'énergie transmise par convection au modérateur.

D'où:

$$M_g C_g \frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{R_{uq}} (T_u - T_g) - \frac{1}{R_{gm}} (T_g - T_m) \quad (1.9)$$

La variation de l'énergie dans le modérateur est égale à l'énergie que lui a cédé la gaine diminuée de l'énergie transmise au circuit primaire.

D'où:

$$M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{R_{gm}} (T_g - T_m) - C_m Q_m (T_i - T_o) \quad (1.10)$$

et la température moyenne du modérateur est à tout instant égale à:

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (1.11)$$

Finalement la thermique du coeur est régie par des équations suivantes:

$$\begin{cases} M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = KPn - K_{ug} (T_u - T_g) \\ M_g C_g \frac{dT_g}{dt} = K_{ug} (T_u - T_g) - K_{gm} (T_g - T_m) \\ M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{gm} (T_g - T_m) - Q_m C_m (T_i - T_o) \end{cases} \quad (1.12)$$

avec:  $T_m = \frac{T_i + T_o}{2}$ ;  $K_{ug} = \frac{1}{R_{ug}}$ ;  $K_{gm} = \frac{1}{R_{gm}}$

et:  $T_e$ : Température d'entrée du fluide caloporteur;

$T_s$ : Température de sortie du fluide caloporteur;

$Q_m$ : Débit de l'eau dans le coeur;

$K$ : Facteur de conversion (watt-calorie);

$Pn$ : Puissance nucléaire dans le coeur;

$R_u$ : Résistance thermique (Uranium-gaine);

$M_u$ : Masse de l'uranium;

$C_u$ : Chaleur massique de l'uranium;

$T_g$ : Température de la gaine;

$R_{gm}$ : Résistance thermique (gaine-modérateur);

$T_m$ : Température moyenne du modérateur.

On remarque que la masse de la gaine est négligeable devant celle de l'Uranium et du fluide primaire ce qui revient à négliger les constantes de temps liées aux échanges (combustible - gaine) devant les constantes de temps

des transitoires que l'on va étudier.

D'où:

$$K_{ug}(T_u - T_g) - K_{gm}(T_g - T_m) = 0 \quad (I.13)$$

Le modèle thermique devient en remplaçant  $T_g$  de l'équation (I.13) et  $T_s$  de l'équation (I.11).

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = KP_n - K_{um}(T_u - T_m) \quad (I.14.a)$$

$$M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{um}(T_u - T_m) - 2Q_m C_m (T_m - T_o) \quad (I.14.b)$$

avec:

$$K_{um} = \frac{K_{ug} K_{gm}}{K_{ug} + K_{gm}} \quad (I.15)$$

$K_{um}$ : représente le coefficient de transmission globale du combustible vers le fluide primaire.

D'où le modèle du réacteur retenu:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_n}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\theta} P_n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} P_n - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6 \\ M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = KP_n - K_{um}(T_u - T_m) \\ M_m C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{um}(T_u - T_m) - 2Q_m C_m (T_m - T_o) \\ \rho = \rho_R - \alpha_u (T_u - T_{u0}) - \alpha_m (T_m - T_{m0}) \\ T_m = \frac{T_2 + T_1}{2} \end{array} \right. \quad (I.16)$$

Le modèle mathématique (I.5) et (I.6) peut être simplifié en remarquant qu'on peut utiliser les équations cinétiques à 2 groupes de neutrons retardés.

Les constantes de désintégration sont calculées à l'aide des relations suivantes:

$$\lambda_1 = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^3 \beta_i \lambda_i} \quad ; \quad \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

$$\lambda_2 = \frac{\beta}{\sum_{i=4}^6 \beta_i \lambda_i} \quad ; \quad \beta_1 = \sum_{i=1}^3 \beta_i \quad ; \quad \beta_2 = \sum_{i=4}^6 \beta_i$$

Le système simplifié est donc:

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\theta} P_n + \sum_{i=1}^2 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_1}{dt} &= \frac{\beta_1}{\theta} P_n - \lambda_1 C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} &= \frac{\beta_2}{\theta} P_n - \lambda_2 C_2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

Et en remplaçant  $\rho$  par son expression on aura le système final suivant:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_n}{dt} &= \frac{1}{\theta} (\rho_0 - \alpha_u (T_u - T_{u0}) - \beta) P_n + \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 \\ \frac{dC_1}{dt} &= \frac{\beta_1}{\theta} P_n - \lambda_1 C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} &= \frac{\beta_2}{\theta} P_n - \lambda_2 C_2 \\ \frac{dT_u}{dt} &= \frac{K}{M_u C_u} P_n - \frac{K_{um}}{M_u C_u} (T_u - T_m) \\ \frac{dT_m}{dt} &= \frac{K_{um}}{M_m C_m} (T_u - T_m) - 2Q_m C_m (T_m - T_0) \end{aligned} \right. \quad (1.18)$$

En le mettant sous forme d'état avec:

$$X^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] = [P_n \ C_1 \ C_2 \ T_u \ T_m];$$

$$U = \rho_0;$$

La commande  $U$  est la réactivité des barres de contrôle.

On aura:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\theta} (\alpha_u T_{u0} + \alpha_m T_{m0} - \beta) x_1 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 x_3 - \frac{\alpha_u}{\theta} x_1 x_4 - \frac{\alpha_m}{\theta} x_1 x_5 + \frac{x_1}{\theta} U \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{\beta_1}{\theta} x_1 - \lambda_1 x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{\beta_2}{\theta} x_1 - \lambda_2 x_3 \\ \frac{dx_4}{dt} = \frac{K}{M_u C_u} x_1 - \frac{K_{um}}{M_u C_u} (x_4 - x_5) \\ \frac{dx_5}{dt} = \frac{K_{um}}{M_m C_m} (x_4 - x_5) - 2Q_m C_m (x_5 - T_0) \end{cases} \quad (1.19)$$

qui a la forme bilinéaire suivante:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)U;$$

avec:

$$f(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\theta} (\alpha_u T_{u0} + \alpha_m T_{m0} - \beta) x_1 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 x_3 - \frac{\alpha_u}{\theta} x_1 x_4 - \frac{\alpha_m}{\theta} x_1 x_5 \\ \frac{\beta_1}{\theta} x_1 - \lambda_1 x_2 \\ \frac{\beta_2}{\theta} x_1 - \lambda_2 x_3 \\ \frac{K}{M_u C_u} x_1 - \frac{K_{um}}{M_u C_u} (x_4 - x_5) \\ \frac{dx_5}{dt} = \frac{K_{um}}{M_m C_m} (x_4 - x_5) - 2Q_m C_m (x_5 - T_0) \end{bmatrix}$$

et:

$$g(X) = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{\theta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# CHAPTER II



## II.1) COMMANDE ADAPTATIVE

### II.1.1) INTRODUCTION:

Considérée comme une partie importante de la commande moderne, la commande adaptative a connu un essor considérable tout au long de ces dernières années.

Intuitivement un régulateur adaptative est un régulateur qui répond au changement de la dynamique du procédé, par un réajustement de ces paramètres. En effet, dans une situation où les paramètres du modèle du procédé sont inconnus on varie dans le temps, les performances d'une loi de commande linéaire se dégradent d'autant plus que l'écart entre la dynamique effective du processus et celle de son modèle est important.

La commande adaptative peut être utilisé pour:

- L'ajustement automatique des régulateurs à la mise en oeuvre => réduction du temps d'ajustement et amélioration des performances.
- La détermination automatique des paramètres optimaux des régulateurs pour différentes zones de fonctionnement des procédés (ces anomalies se reflètent dans les valeurs des paramètres fournies par les algorithmes d'adaptation).

Il existe plusieurs techniques de commande adaptative, Les deux principales sont:

- Commande adaptative avec modèle de référence ( MRAC );
- Commande adaptative Auto- Ajustable ( Self-tuning Régulator ).

### II.1.2) COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODELE DE REFERENCE:

Dans le ( MRAC ), les performances désirées sont réalisées sous forme d'un modèle à suivre, le régulateur est constitué de deux boucles: une boucle interne contenant le régulateur et le procédé à commander, l'écart entre la sortie du système et celle du modèle de référence est utilisé par un algorithme

d'adaptation pour faire varier les paramètres du régulateur dans la boucle externe, pour réaliser la meilleure poursuite possible.

Le (MRAC) était à l'origine développé par Whitaker et ses collaborateurs dans MIT en 1958.

Le schéma bloc du MRAC est montré par la figure (II.1):

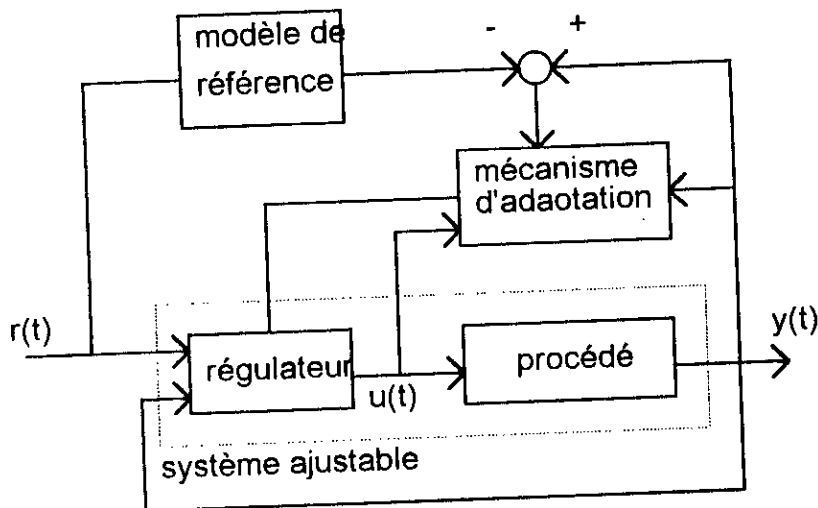


fig.(II.1):Commande adaptative (MRAC)

L'écart entre la sortie du modèle de référence et la sortie du système ajustable est utilisé par un mécanisme d'adaptation pour modifier les paramètres de façon à minimiser l'écart.

Cette approche de commande adaptative est généralement appliquée avec les systèmes déterministes.

### II.1.3) REGLAGE AUTO-AJUSTABLE (Self-Tuning Regulators):

Le réglage Auto-Ajustable est une autre approche de la commande adaptative. Introduite par Åstrom et Wittemark en 1973, le STR a pour objectif de commander les systèmes à paramètres inconnus ou variant dans le temps.

Le principe de cette approche est l'ajustement des paramètres du régulateur à l'aide d'une boucle externe, celle-ci est composée de deux blocs (figure II.2):

-Bloc d'estimation récurrente;

-Bloc de calcul de la commande à partir des paramètres estimés.

Le réglage Auto-Ajustable est basé sur l'estimation en temps réel des paramètres du système ou ceux du régulateur, la commande est ensuite calculée en utilisant les paramètres estimés.

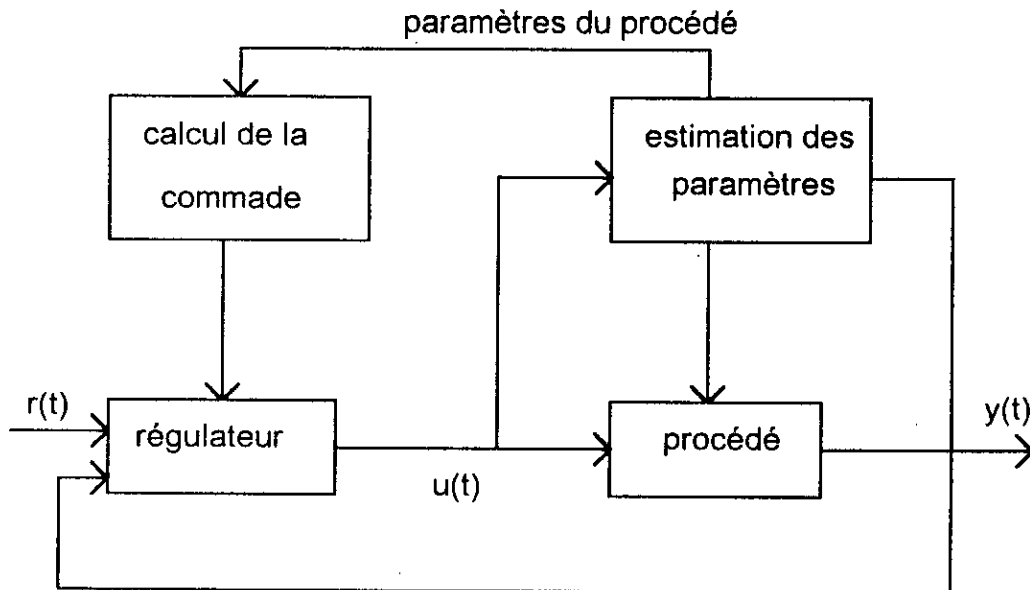


fig.(II.2): Réglage Auto-Ajustable

On distingue deux approches de commande auto-ajustable, la commande adaptative indirecte et directe.

#### a) La commande adaptative directe:

Cette approche ne comprend qu'un seul étage à chaque période d'échantillonnage, les paramètres du régulateur sont directement identifiés de manière réursive.

La commande adaptative directe est basée sur la théorie de la commande prédictive. Dans ce cas on identifie implicitement le procédé mais reparamétrisé en terme de prédiction.

**b) La commande adaptative indirecte:**

Qui comporte deux étages à chaque période d'échantillonnage. Dans une première phase on identifie de manière récursive les paramètres du modèle, puis dans une deuxième phase, on calcule les paramètres du régulateur à partir des paramètres du procédé estimés.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour réaliser l'estimation des paramètres du système telles que les moindres carrés récursifs à trace constante, maximum de vraisemblance ... Le bloc de calcul de la commande dépend de la méthode choisie: La commande prédictive généralisé ( GPC), variance minimale ( MV), placement de pôles (pp),....ect.

**II.2) ESTIMATION DES PARAMETRES:****II.2.1) Introduction:**

La détermination en temps réel (on-line) des paramètres du processus est un élément clé dans la commande adaptative. C'est une partie importante de la régulation auto- ajustable.

L'estimation des paramètres ou l'identification consiste à déterminer un ensemble d'équation d'un modèle décrivant le mieux possible le procédé.

L'identification comporte deux étapes, la première consiste à fixer la forme des équations, c'est l'étape qualitative. La seconde consiste à trouver les valeurs numériques qui seront déterminées pour que le comportement du modèle soit le plus proche de celui du système. Cette proximité se mesure à l'aide d'un critère. Une fois ce critère choisi, on fait appel aux mathématiques pour réduire la différence système- modèle (figure(II.3)) .

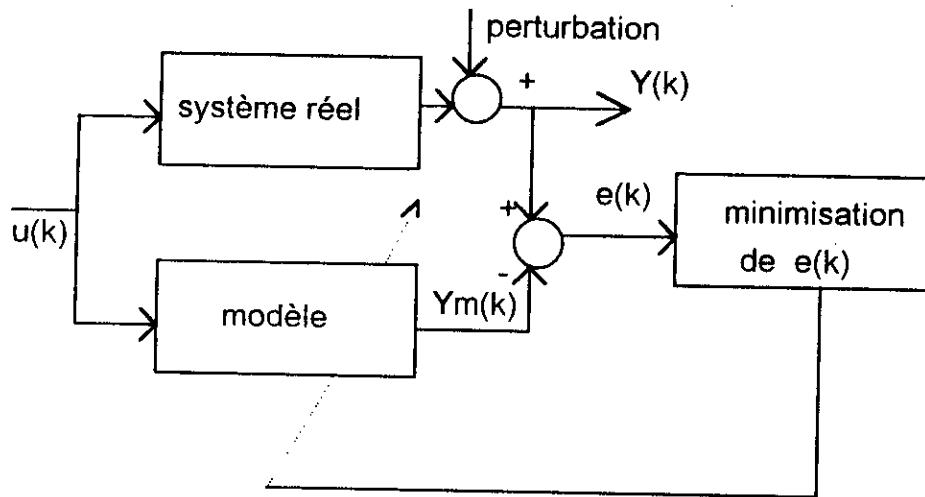


fig.(II.3): Principe de l'identification

$U(t)$ : Vecteur de commande;

$Y(t)$ : Sortie réelle;

$\xi(t)$ : Bruit de mesure;

$Y_m(t)$ : Sortie modèle;

$e(t)$ : Ecart sorties système modèle.

### II.2.2) Les structures du modèles:

Les processus physiques sont souvent décrit par des équations aux différences linéaires et invariantes, sous les formes générales suivantes:

- Modèle de type auto régression A.R :

$$A(q^{-1})Y(t) = \lambda\zeta(t) \quad (\text{II.1})$$

- Modèle de type régression M.A :

$$Y(t) = B(q^{-1})V(t) + \lambda\zeta(t) \quad (\text{II.2})$$

- Modèle de type A.R.M.A :

$$A(q^{-1})Y(t) = B(q^{-1})V(t) + \lambda\zeta(t) \quad (\text{II.3})$$

- Modèle de type A.R.M.A.X :

$$A(q^{-1})Y(t) = B(q^{-1})U(t) + \lambda C(q^{-1})\zeta(t) \quad (\text{II.4})$$

$Y(t)$ ,  $U(t)$ ,  $\zeta(t)$  représentent respectivement, sortie, entrée du système et bruit agissant sur celui-ci.

### II-3) Type du modèle utilisé:

On représente le comportement entrée / sortie du système par le modèle CARIMA (Controlled Auto- Regressive Integrated and Moving Average) suivant:

$$A(q^{-1})Y(T) = q^{-d}B(q^{-1})U(t-1) + V(t) + W(t)$$

où:  $V(t)$ ,  $y(t)$  sont respectivement l'entrée et la sortie du système;

$d$ : retard pur du procédé en période d'échantillonnage;

$V(t)$ : représente les perturbations externes qui affectent le fonctionnement du procédé.

Pour pouvoir compenser les perturbations externes on supposera que la séquence  $\{ V(t) \}$  est modélisée par:

$$\begin{aligned} D(q^{-1})V(t) &= V(t) \\ G(q^{-1})V(t) &= F(q^{-1})\xi(t) \end{aligned} \quad (II.5)$$

avec:

$$\begin{aligned} F(q^{-1}) &= 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_nq^{-n} \\ G(q^{-1}) &= 1 + g_1q^{-1} + g_2q^{-2} + \dots + g_mq^{-m} \\ D(q^{-1}) &= 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_nq^{-n} \end{aligned}$$

où:

\*  $\xi(t)$  : représente une séquence de bruit blanc à moyenne nulle .

\*  $F(q^{-1})$  et  $G(q^{-1})$  sont des polynômes asymptotiquement stables

( i.e  $F(q^{-1}) = G(q^{-1}) = 0 \Rightarrow |q| < 1$  ) .

\*  $D(q^{-1})$  est un polynôme représentant le modèle interne de la perturbation

externe (supposé connu) qui peut prendre l'une des formes suivantes:

$$\begin{aligned} D(q^{-1}) &= 1 - q^{-p} \\ D(q^{-1}) &= \prod_{i=1}^p (1 - 2\cos(\alpha_i)q^{-1} + q^{-2})^p \end{aligned} \quad (II.6)$$

Le cas  $D(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$  permet de prendre en compte les perturbations de charge et d'incorporer une action intégrale dans la boucle fermée.

Les perturbations affectant la sortie du procédé et les dynamiques négligées sont regroupées dans la séquence  $\{W(t)\}$ .

### II.2.4) Estimation robuste des paramètres:

Afin d'obtenir une bonne application de l'estimation des paramètres on utilise de 'bonnes données' du modèle et un algorithme d'adaptation paramétrique robuste.

Les 'données utiles' (good-data) du modèle sont obtenues par le filtrage et la normalisation de signaux d'entréc-sortie du procédé comme suit:

$$\bar{y}_t(t) = \theta^T \bar{\phi}_t(t-1) + \bar{v}_t(t) \quad (II.7)$$

avec:

$$\bar{v}_t(t) = W(t) + v_t(t)$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_0, \dots, b_{nb}]^T$$

$$\bar{\phi}(t-1) = [-y(t-1) - y(t-2) \dots - y(t-na) U(t-1-d) \dots U(t-d-nb)]$$

Où l'exposant 'f' et 'n' représentent les opérations de filtrage et de normalisation respectivement.

L'opération de filtrage est réalisée comme suit:

$$F(q^{-1})X_t(t) = D(q^{-1})G(q^{-1})X(t) \quad (II.8)$$

où  $X(t)$  représente le signal à filtrer.

L'opération de normalisation consiste à diviser le vecteur d'observation et de mesure à l'instant 't' par la racine carrée de:

$$\eta(t) = \mu\eta(t-1) + (1-\mu)\max(\phi_t^T(t)\phi_t(t), \eta_0)$$

avec:  $0 \leq \mu \leq 1; 0 < \eta(0); \eta_0 < \infty$

le signal normalisé est donc calculé par:

$$\sqrt{\eta(t)} \bar{X}(t) = X(t)$$

**Remarque:**

\* L'opération  $\mathcal{D}(q^{-1})$  permet de rejeter l'effet des perturbations.

Le filtre  $\mathcal{G}(q^{-1})/\mathcal{F}(q^{-1})$  doit être passe-bas pour réduire l'effet des modes de hautes fréquence non-modulés et évite ainsi les variations brusques des paramètres estimés.

\*Du fait que la séquence de la dynamique négligée  $W(t)$  n'est pas nécessairement bornée les signaux d'entrée-sortie ne le sont pas non plus.

Pour s'assurer que tous les signaux sont bornés, on utilise la normalisation des données.

En effet, la normalisation a permis de ramener le problème des perturbations non bornées à un problème de perturbations bornées.

Notons que le facteur de normalisation  $\eta(t)$  n'est autre qu'une norme des données d'entrées-sorties passées à travers un filtre du premier ordre  $(1-\mu)[1-\mu q^{-1}]^{-1}$ .

**II.2.5) Algorithme d'adaptation paramétrique:**

L'algorithme d'adaptation paramétrique sert à générer l'estimation  $\hat{\theta}(t)$  des paramètres inconnus  $\theta(t)$ , il doit être choisi de manière à satisfaire les conditions de stabilité du système de commande adaptative associé. Pour ce faire, le modèle estimé doit satisfaire les propriétés suivantes:

1) Avoir des paramètres uniformément bornés.

$$\exists R_\theta \in \mathbb{R}^+; \|\theta(t)\| < R_\theta.$$

C-à-d que le vecteur  $\theta(t)$  se trouve toujours à l'intérieur d'une sphère de rayon  $R_\theta$ .

2) Reproduire, en moyenne, le comportement entrée-sortie du procédé.

$\exists (K_f, N) \in \mathbb{R}^+, \mathbb{R}^+; \forall (l, k) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ , on a:

$$\sum_{i=1}^{l+k} (y(i) - \theta(l) \phi(i-1)) < K_f + K \sqrt{l}.$$



C-à-d que la somme des erreurs entre la sortie réelle et la sortie prédite est inférieure à une constante. Elle croit moins vite que la racine carrée des perturbations.

3) avoir des paramètres qui évoluent relativement lentement par rapport à l'état du procédé.

$$\begin{aligned} \exists (K_\theta, V) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}; \forall (l, k) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \\ \sum_{t=l+1}^{l+k} \|\theta(t) - \theta(t-1)\| < K_\theta + K\sqrt{V}. \end{aligned} \quad (II.9)$$

4) être admissible, en moyenne, par rapport à la loi de commande considérée.

Il existe une séquence croissante  $\{t_k\}$ ,  $K \in \mathbb{N}$ , telle que:  $\{t_k - t_{k-1}\}$  est uniformément bornée,  $t \in \mathbb{P}(\theta(t_k), q^{-1})$  et un polynôme caractéristique asymptotiquement stable. C'est à dire que le régulateur calculé à partir des paramètres estimés conduit à un fonctionnement stable en boucle fermée.

Les trois premières conditions peuvent être réalisées par une classe assez large d'algorithmes d'adaptation paramétrique. Ces algorithmes n'assurent, cependant, pas la condition d'admissibilité du modèle estimé. Dans la mesure où cette propriété est principalement due à une surestimation de l'ordre du procédé, elle n'est pas trop cruciale en pratique.

Nous avons choisi d'utiliser l'algorithme d'adaptation paramétrique suivant:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + s(t+1)F(t)\phi(t)\zeta(t+1).$$

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1(t)F(t)^{-1} + \frac{\lambda_2(t)}{\eta} \phi(t)\phi(t)^T$$

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[ F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi(t)^T F(t)}{\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} \eta(t) + \phi(t)^T F(t)\phi(t)} \right] + s(t)R(t) \quad (II.10)$$

$$\zeta(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\theta}(t)^T \phi(t)}{\eta(t) + \phi(t)^T F(t)\phi(t)}$$

Où  $\hat{\theta}(t)$ ,  $\zeta(t)$  et  $F(t)$  représente respectivement, le vecteur des paramètres estimés, l'erreur d'adaptation et le gain d'adaptation.

$s(t)$  est une séquence qui permet de "geler" l'adaptation si l'information entrante dans l'estimateur des paramètres ressemble trop à l'information précédente. elle est défini par:

$$s(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \phi^T(t)F(t)\phi(t) \geq \sigma_0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (II.11)$$

Donc, si la norme est inférieur à un certain  $\sigma_0$  qui donne un horizon d'observation, les informations d'entrée présentées par  $\phi(t)$  peuvent ne pas améliorer l'estimation des paramètres, donc on va garder les mêmes paramètres  $\theta(t)$  calculés à l'étape précédente. Les séquences  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(t)$ , et  $F(t)$  sont choisies de manière à assurer une bonne capacité d'adaptation, soit:

$$\alpha_{\min} I_{np} \leq F(t) \leq \alpha_{\max} I_{np} \\ \text{avec } 0 < \alpha_{\min} \leq \alpha_{\max} < \infty.$$

Avec:  $np$  le nombre des paramètres à estimer.

A noter que les deux séquences de pondération  $\lambda_1(t)$  et  $\lambda_2(t)$  ont un effet opposé.  $\lambda_1(t) < 1$  tend à augmenter le gain d'adaptation (l'inverse du gain décroît),  $\lambda_2(t)$  tend à décroître le gain d'adaptation (l'inverse du gain augmente).

Pour ce travail nous avons retenu l'algorithme des moindres carrés récursif à trace constante. Dans ce cas:  $\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = \lambda(t)$ .

L'effet de  $\lambda(t)$  est d'introduire une pondération de plus en plus faible sur les données anciennes, c'est pour cette raison que  $\lambda$  est appelé 'facteur d'oubli', dans notre cas, ce facteur est choisi automatiquement à chaque pas pour assurer une trace constante de la matrice de gain:

$$\text{tr}F(t+1) = \text{tr}F(t) = \text{tr}F(0) .$$

Il est donné par:

$$\lambda(t) = 1 \cdot \frac{\text{tr}\{F(t)\phi(t)\phi^T(t)F(t)\}}{\text{tr}\{F(t+1)\}\{\eta(t) + \phi^T(t)\phi(t)\}} \quad (\text{II.12}) .$$

# CHAPTER III

### III.1) REGULATEUR NUMERIQUE PID:

A titre de comparaison avec la commande adaptative, nous avons essayé de synthétiser un régulateur PID et ceci à partir du modèle du réacteur linéarisé autour du point de fonctionnement à 25%.

#### III.1.1) Linéarisation du système:

On remarque que notre système (I.18) est non linéaire et que la non linéarité provient du produit '  $\rho P_n$  '.

Pour la linéarisation du système, on pose :

$$\begin{aligned}
 P &= P_n - P_0 \Rightarrow P_n = P_0 + P \\
 X_1 &= C_1 - C_{10} \Rightarrow C_1 = C_{10} + X_1 \\
 X_2 &= C_2 - C_{20} \Rightarrow C_2 = C_{20} + X_2 \\
 \rho &= \delta\rho + \rho_0 \\
 \delta\theta_u &= \theta_u - \theta_{u0} & \text{avec: } \theta_u &= T_u - T_0 \\
 \delta\theta_m &= \theta_m - \theta_{m0} & \theta_m &= T_m - T_0
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

Où:  $P_0, C_{10}, C_{20}, \theta_{u0}, \theta_{m0}, \rho_0$ , représentent espctivement les valeurs de la puissance, des précurseurs, des températures, et de la réactivité pour les quelles le système est à l'équilibre (comme à l'équilibre  $\rho_0 = 0 \Rightarrow \delta\rho = \rho$ ), le système devient:

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dt} &= \frac{-\beta}{\theta} P_n + \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \delta\rho \frac{P_n}{\theta} + \left(\frac{\delta\rho - \beta}{\theta}\right) P_0 + \lambda_1 X_{10} + \lambda_2 X_{20} \\ \frac{dX_1}{dt} &= \frac{-\beta_1}{\theta} P_n - \lambda_1 X_1 + \left(\frac{\beta_1}{\theta} P_0 + \lambda_1 C_{10}\right) \\ \frac{dX_2}{dt} &= \frac{-\beta_2}{\theta} P_n - \lambda_2 X_2 + \left(\frac{\beta_2}{\theta} P_0 + \lambda_2 C_{20}\right) \\ M_u C_u \frac{d\delta\theta_u}{dt} &= K(P_0 + P_n) - K_{um}(\delta\theta_u - \theta_{u0}) + K_{um}(\delta\theta_m + \theta_{m0}) \end{aligned} \tag{III.2}$$

à l'équilibre :

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dt}(P_0, C_{10}, C_{20}, \rho_0) = 0 &\Rightarrow -\frac{\beta}{\theta} P_0 + \lambda_1 C_{10} + \lambda_2 C_{20} = 0 \\ \frac{dC_1}{dt}(P_0, C_{10}, C_{20}, \rho_0) = 0 &\Rightarrow \frac{-\beta_1}{\theta} P_0 - \lambda_1 C_{10} = 0 \\ \frac{dC_2}{dt}(P_0, C_{10}, C_{20}, \rho_0) = 0 &\Rightarrow \frac{-\beta_2}{\theta} P_0 - \lambda_2 C_{20} = 0 \\ \frac{d\theta_u}{dt}(P_0, \theta_{u0}, \theta_{m0}) = 0 &\Rightarrow KP_0 - K_{um}\theta_{u0} + K_{um}\theta_{m0} = 0 \\ \frac{d\theta_m}{dt}(P_0, \theta_{u0}, \theta_{m0}) = 0 &\Rightarrow K_{um}(\theta_{u0} - \theta_{m0}) - 2Q_m C_m \theta_{m0} = 0 \end{aligned} \tag{III.3}$$

Et en remplaçant  $\delta\rho$  par  $(\delta\rho_B - \alpha_u \delta\theta_u - \alpha_m \delta\theta_m)$  on aura le système

final suivant:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta\dot{P} \\ \delta\dot{C}_1 \\ \delta\dot{C}_2 \\ \delta\dot{\theta}_u \\ \delta\dot{\theta}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\beta}{\theta} & \lambda_1 & \lambda_2 & \frac{\alpha_u P_0}{\theta} & \frac{\alpha_m P_0}{\theta} \\ \frac{\beta_1}{\theta} & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_2}{\theta} & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ \frac{K}{M_u C_u} & 0 & 0 & \frac{K_{um}}{M_u C_u} & \frac{K_{um}}{M_u C_u} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{um}}{M_u C_u} & -\frac{K_{um} + 2Q_m C_m}{M_m C_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ X_1 \\ X_2 \\ \delta\theta_u \\ \delta\theta_m \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \frac{P_0}{\theta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \end{aligned} \tag{III.5}$$

Qui a la forme suivante  $\dot{X} = AX + BU$ , avec:  $U = \delta\rho_B$  (pcm). Il suffit de remplacer tous les paramètres par leurs valeurs numériques dans A et B on

trouve:

$$A = \begin{bmatrix} -160 & 0.087 & 0.71 & -506.25 & -5062.5 \\ 71.5 & -0.087 & 0 & 0 & 0 \\ 88.5 & 0 & -0.71 & 0 & 0 \\ 0.039 & 0 & 0 & -0.186 & 0.186 \\ 0 & 0 & 0 & 0.385 & -12.085 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 168.75 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

avec:

$$X = \begin{bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{X}_1 \\ \mathcal{X}_2 \\ \delta\theta_u \\ \delta\theta_m \end{bmatrix}$$

### III.1.2) Régulateur PID:

La version de base du régulateur PID résulte de la discrétisation du régulateur PID continu à actions proportionnelle, intégrale et dérivée indépendantes.

Considérons la fonction de transfert du régulateur continu PID:

$$C(s) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (\text{III.6})$$

où également:

$$C(s) = \frac{K(1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s} \quad (\text{III.7})$$

Pour la discrétisation nous approximations  $s$ , la variable de Laplace, par  $\frac{1-q^{-1}}{T_s}$  et nous obtenons la fonction de transfert échantillonnée du régulateur numérique:

$$C(q^{-1}) = K \left[ 1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-q^{-1}} + T_d \frac{1-q^{-1}}{T_s} \right] \quad (\text{III.8})$$

La méthode de détermination des paramètres du correcteur PID est celle introduite par Patrick Boucher [9], où on utilise le critère de Nyquist.

Le ' lieu critique '  $-\frac{1}{C(s)}$  pour un régulateur PID est donné par un

cercle de diamètre  $1/k$  centré sur l'axe réel négatif passant par l'origine.

Soit  $M(x,y)$  représentatif de  $H(j\omega)$ . Afin d'obtenir une bande passante  $\omega_0$  et une marge de phase  $\varphi$ , pour le système corrigé, on effectue une rotation de centre  $o(0,0)$  et d'angle  $\varphi$ . On obtient  $N(x,y)$  représentatif de  $C(j\omega)$ .

### III.1.3) Détermination de $K$ , $T_i$ , $T_d$ :

$N(x,y)$  étant représentatif de  $C(j\omega)$ , on a:

$$\begin{aligned} x &= \frac{-T_i^2 \omega_0^2}{K(1 - T_i T_d \omega_0^2)^2 + T_i \omega_0^2} \\ y &= \frac{-T_i \omega_0 (1 - T_i T_d \omega_0^2)}{K[(1 - T_i T_d \omega_0^2)^2 + T_i \omega_0^2]} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Nous choisirons d'adopter pour  $T_i$  et  $T_d$  la relation:  $T_i = 4 T_d$ . On aura donc:

$$K = \frac{-x}{x^2 + y^2}, \quad T_i = 4 T_d \quad \text{avec:}$$

$$4 T_d^2 \omega_0^2 x + 4 T_d \omega_0 y - x = 0$$

soit:

$$T_d = \frac{-y - \sqrt{x^2 + y^2}}{2x\omega_0} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{où: } x = \text{Re}[H(j\omega_0)]$$

$$y = \text{Im}[H(j\omega_0)]$$

$$X = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (\text{rotation } (o, \varphi)) \quad (\text{III.11})$$

$$Y = y \cos \varphi - x \sin \varphi$$

Pour un réglage temporel, on doit donner le temps du 1° maximum  $T_r$  et le dépassement en  $\%(D)$ , qui sont relatif à la réponse indicielle en boucle fermée.

A partir du temps du 1° maximum on calcule la bande passante:  $\omega_0 = 2.8/T_r$ . Et à partir du dépassement en  $\% D$ , on calcul la marge de phase en degrés:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\log^2(D/100)}{\log^2(D/100) + 10}} \times 100 \quad (\text{III.12})$$



Ces deux formules empiriques permettant le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel sont déduites des propriétés des systèmes du second ordre.

Dans notre cas, le régulateur PID est synthétisé de manière à assurer les performances du système linéaire ( $D\%$ ,  $T_r$ ), il est ensuite appliqué sur le modèle non linéaire du réacteur.

## III.2) COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE GPC

### III.2.1) Introduction :

Depuis une dizaine d'années, on note d'importants progrès dans le domaine du self-tuning et de la commande adaptative aussi bien en théorie qu'en pratique.

L'inconvénient majeur de ces méthodes proposées dans la littérature réside dans la difficulté de leurs applications à des procédés ayant des propriétés suivantes:

- 1) Les procédé à phase non minimale;
- 2) Les procédé instable en boucle ouverte;
- 3) Les procédé avec retard variable et/ou inconnu;
- 4) Les procédé à structure (ordre) inconnue.

C'est pour résoudre ces types de problèmes qu'a été introduite la notion de commande prédictive notamment la commande prédictive généralisée (GPC) proposée par (D.W CLARKE, C.MOhtadi et P.S Tuffs).

Le G.P.C est un des derniers membres de la famille des commandes à horizon étendu (long-range prédictive contrôle (LRPC)) et représente une génération des algorithmes de LRPC.

L'objectif de cette loi de commande prédictive consiste à prendre en compte à l'instant présent le comportement futur et de conduire la sortie future du système  $Y(t+j)$  à la référence  $r(t+j)$  ( $j=1,2,\dots$ ). Pour cela il faut que la séquence future  $r(t+j)$  soit connue pour  $j=1,2,\dots$

Dans ce chapitre, après avoir donné la classe des modèles à stabiliser, le problème de commande est formulé sous forme de la minimisation d'un critère quadratique général, objectif principal de la commande GPC.

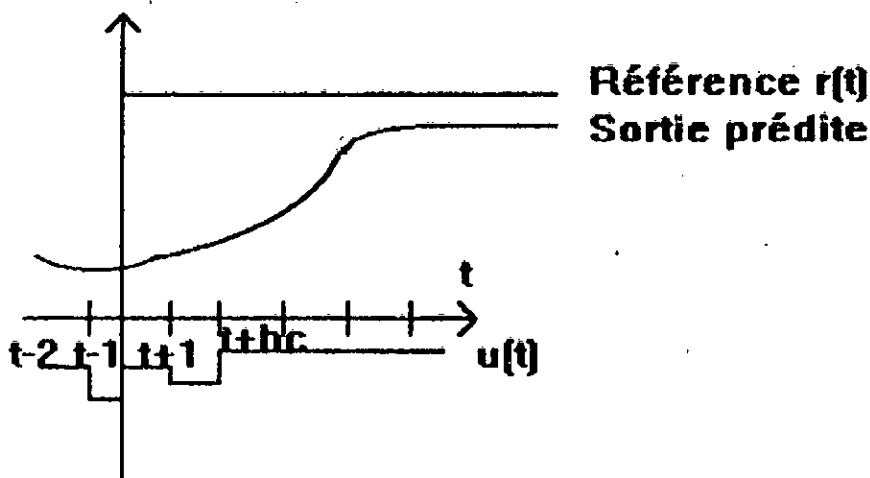


Figure (III.1) Référence, commande et sortie dans la GPC

**III.2.2) Représentation du procédé par un modèle CARIMA est prédiction de la sortie:**

Quand on considère la régulation d'un point de fonctionnement particulier, les procédé non linéaire accepte en général le modèle localement linéarisé suivant:

$$A(q^{-1})Y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + W(t) \tag{III.13}$$

où A et B sont des polynôme sen  $q^{-1}$ :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_m q^{-m}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$$

Si le procédé a un retard non nul le premier élément du polynôme  $B(q^{-1})$  est nul.

$u(t)$  et  $y(t)$  sont respectivement l'entrée et la sortie du procédé.

Dans la littérature  $W(t)$ , représentant les perturbations, est modéliséé comme suit:

$$W(t) = \frac{C(q^{-1})\xi(t)}{\Delta(q^{-1})} \tag{III.14}$$

$$\text{où: } C(q^{-1}) = 1 + C_1 q^{-1} + \dots + C_m q^{-m}$$

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

Dans cette équation,  $\xi(t)$  est une séquence uniformément bornée, de moyenne nulle; nous obtenons ainsi le modèle CARIMA (Controlled Auto-Regressive and Moving-Average) suivant:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t+1) + C(q^{-1})\xi(t)/\Delta(q^{-1})$$

Ce modèle a été introduit par Tuffs et Clarke (1985).

Pour simplicité de développement  $C(q^{-1})$  est choisi égale à 1 pour avoir le modèle suivant:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})U(t-1) + \xi(t)/\Delta \quad (\text{III.15})$$

Pour pouvoir estimer les  $j$ -pas futurs du prédicteur de  $y(t+j)$  basé sur (III.15) on considère l'identité suivante:

$$1 = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (\text{III.16})$$

qui est appelé équation de Diophantine.

Où  $E_j$  et  $F_j$  représentent la solution unique de cette équation.

Les deux polynômes sont entièrement déterminés connaissant  $A(q^{-1})$

et l'intervalle de prédiction  $j$ .

où:

$$E_j = e_0 + e_1 q^{-1} + \dots + e_{j-1} q^{-j+1}$$

$$F_j = F_0^j + F_1^j q^{-1} + \dots + F_m^j q^{-m}$$

avec :  $\deg E_j(q^{-1}) = j - 1$

$$\deg F_j(q^{-1}) = m = na$$

Si on multiplie l'équation (III.15) par  $E_j \Delta q^{-1}$  on aura:

$$- - E_j A \Delta y(t+j) = E_j B \Delta U(t+j-1) + E_j \xi(t+j)$$

La substitution de  $E_j A \Delta$  de l'équation (III.16) donne:

$$Y(t+j) = E_j B \Delta U(t+j-1) + F_j y(t) + E_j \xi(t+j) \quad (\text{III.17})$$

Comme  $E_j(q^{-1})$  est de degré  $j-1$  les composantes des perturbations sont

toutes dans le future, donc le prédicteur optimal est donné par:

$$\hat{y}(t+j) = G_j \Delta U(t+j-1) + F_j y(t)$$

avec:

$$G_j(q^{-1}) = E_j B$$

(III.18)

notons que:  $G_j(q^{-1}) = B(q^{-1})[1 - q^{-j}F_j(q^{-1})]/A(q^{-1})\Delta$ .

Une méthode pour calculer  $G_j$  est simplement de considéré la transformée en z de la réponse indicielle du procédé et de prendre les premiers  $j$  termes (Clarke est Zharag 1985).

### III.2.3) Récurrence de l'équation de Diophantine:

Dans le cas adaptatif, à chaque pas il faut recalculer la solution de l'équation de Diophantine, avec  $j=1, \dots, hp$ . Une solution numériquement stable et peu coûteuse en temps de calcul est d'exprimer de façon récursive les valeurs des coefficients de  $E_{j+1}$  et  $F_{j+1}$  à partir de celles obtenues pour  $E_j$  et  $F_j$  nous pouvons résumer le calcul récursif de (III.16) de la façon suivante:

$$1 = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (III.19)$$

$$1 = E_{j+1}(q^{-1})A\Delta + q^{-(j+1)}F_{j+1}(q^{-1}) \quad (III.20)$$

pour des raisons de clarté de notation on suppose que:

$$E = E_j, R = E_{j+1}, F = F_j, S = F_{j+1}$$

$\bar{A}$  est définie comme  $A\Delta$ , les équations (III.19) et (III.20) s'écrivent alors:

$$1 = E\bar{A} + q^{-j}F \quad (III.21)$$

$$1 = R\bar{A} + q^{-(j+1)}S \quad (III.22)$$

La soustraction des deux équations (III.21) et (III.22) donne:

$$0 = \bar{A}(R - E) + q^{-j}(q^{-1}S - F)$$

Le polynôme  $(R-E)$  est de degré  $j$  est peut être divisé en deux termes:

$$R - E = \bar{R} + \tau_j q^{-j}$$

et:

$$\bar{A}\bar{R} + q^{-j}(q^{-1}S - F + \bar{A}\tau_j) = 0$$

il est clair que  $\bar{R} = 0$  et encore  $S$  est donné par  $q(F - \bar{A}r_j)$ .

Et comme le premier élément de  $\bar{A}$  est égale à 1, on a:

$$r_j = r_0 \quad (\text{III.23.a})$$

$$s_j = r_{j+1} - \bar{a}r_j \quad (\text{III.23.b})$$

pour  $i = 0$  jusqu'au degré de  $S(q^{-1})S(q^{-1})$ .

et:

$$R(q^{-1}) = E(q^{-1}) + q^{-1}r_j R(q^{-1}) = E(q^{-1}) + q^{-1}r_j \quad (\text{III.24})$$

$$G_{j+1} = B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (\text{III.25})$$

Donc, en donnant les polynomes du modèle  $A(q^{-1})$  et  $B(q^{-1})$  et une solution  $E_j(q^{-1})$  et  $F_j(q^{-1})$ , l'équation (III.23) peut être utilisée pour obtenir

$F_{j+1}$  et l'équation (III.24) nous donne  $E_{j+1}$ .

pour  $j-1$ , on a:

$$1 = E_j \bar{A} + q^{-1}F_j$$

et puisque le premier élément de  $\bar{A}$  est égale à 1, alors:

$$E_j = 1, F_j = q(1 - \bar{A})$$

### III.2.4) Objectif de la commande :

On considère le critère à minimiser (fonction coût) de la forme :

$$J(t, h_i, h_p) = E \left\{ \sum_{j=1}^{h_p} [y(t+j) - y^*(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{h_p} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (\text{III.26})$$

où :  $y^*(t+j)$ : la référence à l'instant  $(t+j)$ ;

$\lambda(j)$  : Séquence de pondération sur la commande;

$h_p$ : horizon de prédiction, il est choisi en général égale au temps de montée;

$h_i$ : horizon d'initialisation. S'il est a priori connu que le retard du procédé est inférieur à  $k$  pas d'échantillonnage, alors  $h_i$  peut être choisi inférieur ou égale à  $k$ .

Pour simplicité de dérivation, par la suite  $\lambda(j)$  est choisi constant égale à  $\lambda$ ,  $h_i$  égale à 1 et  $h_p$  égale à  $N$ .

### III.2.5) Calcul du prédicteur à j-pas:

De l'équation (III.17), les futures réponses:

$$y(t+1) = G_1 \Delta u(t) + F_1 y(t) + E_1 \xi(t+1)$$

$$y(t+2) = G_2 \Delta u(t+1) + F_2 y(t) + E_2 \xi(t+2)$$

$$\vdots$$

$$y(t+N) = G_N \Delta u(t+N-1) + F_N y(t) + E_N \xi(t+N)$$

En considérant  $y(t+j)$ , on constate qu'elle est constituée de trois termes: un premier terme dépendant des futures commandes pouvant être déterminées.

Un deuxième terme qui dépend des commandes et des sorties mesurées à des instants passés et le troisième terme dépend des perturbations futures  $\{\xi(t+j)\}$  qui seront ignorées dans le calcul des prédictions.

On posant  $f(t+j)$  la composante de  $y(t+j)$  composée de signaux connus à l'instant  $t$ , par exemple:

$$[G_2(q^{-1}) - q^{-1}g_{21} - g_{20}] \Delta u(t) + F_2 y(t)$$

etc

$$\text{où: } G_j(q^{-1}) = g_{j0} + g_{j1}q^{-1} + \dots$$

Donc, pour un horizon de prédiction égale à  $N$ , l'expression du prédicteur peut être donnée par la forme vectorielle suivante:

$$\hat{y} = G\hat{U} + F$$

où tous les vecteurs sont de dimension  $(N \times 1)$ .

Avec:

$$\hat{y} = [\hat{y}(t+1), \hat{y}(t+2), \dots, \hat{y}(t+N)]^T$$

$$\hat{U} = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N-1)]^T$$

$$F = [f(t+1), f(t+2), \dots, f(t+N)]^T$$

La matrice  $G$  est une matrice triangulaire inférieure de dimension  $N \times N$ :

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}$$

avec:

$$g_i = g_j \text{ pour } j = 0, 1, 2, \dots, < i$$

**III.2.6) Minimisation du critère et calcul de la loi de commande:**

D'après la définition des vecteurs ci dessus avec:

$$W = [y^*(t+1), y^*(t+2), \dots, y^*(t+N)]^T$$

L'expression de la fonction coût (III.26) peut être écrite de la manière suivante:

$$J_1 = E \{ J(1, N) \}$$

$$= E \{ (y - w)^T (y - w) + \lambda \hat{u}^T \hat{u} \}$$

c'est - à - dire:

$$J_1 = \{ (G\hat{u} + f - w)^T (G\hat{u} + f - w) + \lambda \hat{u}^T \hat{u} \}$$

La minimisation de  $J_1$  par rapport à  $\hat{u}$  donne:

$$\hat{u} = (G^T G + \lambda)^{-1} G^T (w - f) \tag{III.27}$$

On note que le premier élément de  $\hat{u}$  est  $\Delta u(t)$ , d'où la commande courante  $u(t)$  est donnée par:

$$u(t) = u(t-1) + \bar{g}^T (w - f) \tag{III.28}$$

où  $\bar{g}^T$  est la première ligne de  $(G^T G + \lambda)^{-1} G^T$ , par conséquent la commande inclue une action intégrale qui a pour effet la compensation de zéro. Pour une référence constante:  $y(t+i)=y$ , le vecteur  $f$  donne un gain unité dans la boucle fermée.

inconnu (cas adaptatif),  $h_i$  doit être mis à un et le degré de  $B(q^{-1})$  augmente pour renfermer toutes valeurs possibles de  $k$ .

$h_i = \text{retard du système} / \text{période d'échantillonnage}$ .

### b) Horizon final de prédiction:

En général,  $h_p$  est choisit de telle manière qu'il renferme toute la réponse qui est significativement affectée par la commande courante. Il est raisonnable qu'il doit être au minimum supérieur à l'ordre de  $B(q^{-1})$ . En effet, si  $h_i$  est supérieur au retard du système qui lui même en rapport avec le degré de  $B$ , ce qui veut dire que  $h_p$  est supérieur ou égale à  $h_i$ .

Dans la commande des systèmes, on privilégie le régime établi, en effet, ce régime peut être atteint par augmentation de  $h_p$  avec des commandes douces, mais au détriment du temps de réponse.

En règle générale  $h_p$ , est choisit de façon à ce qu'il corresponde au temps de réponse du système.

donc:  $h_p = \text{temps de montée} / \text{période d'échantillonnage}$ .

### REMARQUES:

- 1- Une large classe de systèmes peuvent être stabilisé avec le GPC avec les valeurs par défaut de 1 et 10 pour  $h_i$  et  $h_p$ .
- 2- Pour tout procédé stable, la dynamique de régulation devient plus rapide lorsque l'horizon de prédiction diminue.
- 3- Pour certains systèmes, une valeur de  $h_p$  assez petite ne fournira pas un réglage stable.

### c) Horizon de commande $h_c$ :

Généralement, il est trouvé que la valeur de  $h_c$  égale à un est adéquate pour des modèles typiques de procédés industriels. L'augmentation de  $h_c$  ne fait que rendre la commande plus active, une plus grande augmentation ne fera pas une grande différence.



Cette augmentation introduit une énorme complexité de calcul d'où un temps de calcul très important.

Dans le cas de la commande numérique à paramètres connus, ce temps de calcul ne nous intéresse pas puisqu'ils se feront hors ligne, donc on a intérêt dans le cas adaptatif à fixer  $h_c$  le plus petit possible ( $h_c = 1$ ).

Une grande valeur de  $h_c$  est plus approprié pour les systèmes complexes où il est trouvé qu'une bonne commande est achevée lorsque  $h_c$  est en minimum égale au nombre des pôles instables ou mal amorties.

#### d) Coefficient de pondération de la commande $\lambda$ :

L'atténuation des variations brusques de commande que l'on peut constater avec cette algorithme (GPC) est possible par l'introduction du paramètre  $\lambda$ . Ce dernier permet de donner plus au moins de poids à la commande de façon à assurer de bonnes réponses lorsque le système de départ présente un risque de stabilité.

Le coefficient  $\lambda$  ne peut être lié qu'au gain du système à régler, parceque plus le gain du système est grand plus la commande doit être pondérée, c'est à dire plus  $\lambda$  est important et inversement .

Donc  $\lambda$  doit être choisi de manière à amplifier ou réduire l'effet de commande.

#### III.2.8) Algorithme de commande adaptative :

La commande adaptative prédictive généralisée (GPC) obéit aux étapes suivantes:

→ Données: spécifier  $A$ ,  $B$ ,  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $h_i$ ,  $h_p$ ,  $h_c$ ,  $w$ (séquences de références futures).

→ Etape 1: Estimation des paramètres  $A(q^{-1})$ ,  $B(q^{-1})$  du procédé en utilisant l'algorithme d'adaptation paramétrique présenté au chapitre (II) avec:

$$\theta(t) = [a_1(t) \ a_2(t) \ \dots \ a_{na}(t) \ b_0(t) \ \dots \ b_{nb}(t)]^T$$

$$\phi(t) = [-y(t) - y(t-na)u(t-d-1) \ \dots \ u(t-d-1-nb)]^T$$

- Filtrage et normalisation des signaux d'entrée sortie.
- Calcul des paramètres estimés en utilisant les équations [II.10].
- Etape 2: utiliser l'estimation du vecteur  $\theta(t)$  pour calculer la commande  $u(t)$ .
- Résolution de l'équation de Diophantine (III.16).  $j=1, hp$
- Calcul du prédicteur à  $j$ -pas donné par l'équation (III.18).
- Calcul de la commande  $u(t)$  à partir de l'équation (III.28).
- Etape 3: tous les vecteurs de données sont décalés de telle sorte que les calculs peuvent être répétés à chaque instant. Faire  $t = t+1$  et revenir à l'étape 1.

**CHAPTER  
XV**

#### IV-1) Introduction:

Une centrale électronucléaire connectée à un réseau où la consommation varie au cours du temps doit s'adapter à cette demande à chaque instant et maintenir son état à l'intérieur d'un domaine neutronique et thermodynamique prédéterminé par le fonctionnement optimal de la centrale et les règles de sécurité. Le système de contrôle automatique règle la température moyenne  $T_m$  du modérateur dans le cœur pour suivre une fonction croissante de la demande en puissance.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la simulation du système en boucle ouverte, puis en boucle fermée en utilisant un régulateur conventionnel du type PID et un régulateur adaptatif basé sur la commande prédictive généralisée. Dans ce dernier cas on étudiera dans une première étape l'influence des paramètres de synthèse du GPC ( $h_i, h_p, h_c, \dots$ ) appliqué sur un système linéaire puis, dans la deuxième étape, on présentera les résultats obtenus lorsque la commande GPC est appliquée au réacteur PWR.

Avant d'entamer les simulations, nous allons remplacer les paramètres du système par leurs valeurs numériques, on aura le modèle suivant (voir § 1-3):

$$\dot{P}(t) = \frac{-0,0064 - 3 \cdot 10^{-5} [T_v(t) - 430,13] - 3 \cdot 10^{-4} [T_m(t) - 288,6]}{4 \cdot 10^{-5}} P(t) + 0,087 C_1(t) + 0,71 C_2(t) + 0,25 P(t) U(t)$$

$$\dot{C}_1(t) = 71,5 P(t) - 0,087 C_1(t)$$

$$\dot{C}_2(t) = 88,5 P(t) - 0,71 C_2(t)$$

$$\dot{T}_v(t) = 0,039 P(t) - 0,186 (T_v(t) - T_m(t))$$

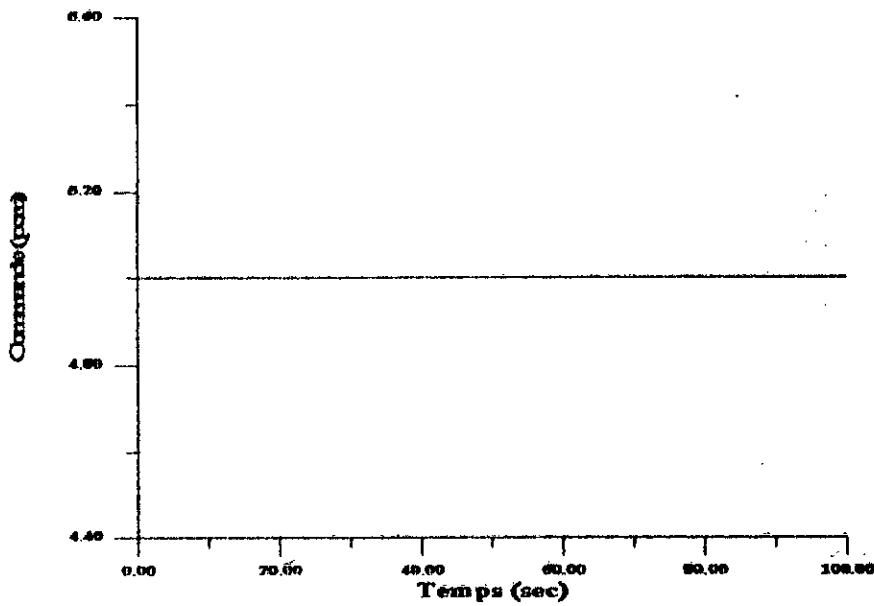
$$\dot{T}_m = 0,385 T_v(t) - 12,085 T_m(t) + 3222,8$$

#### IV-2) Simulation en boucle ouverte:

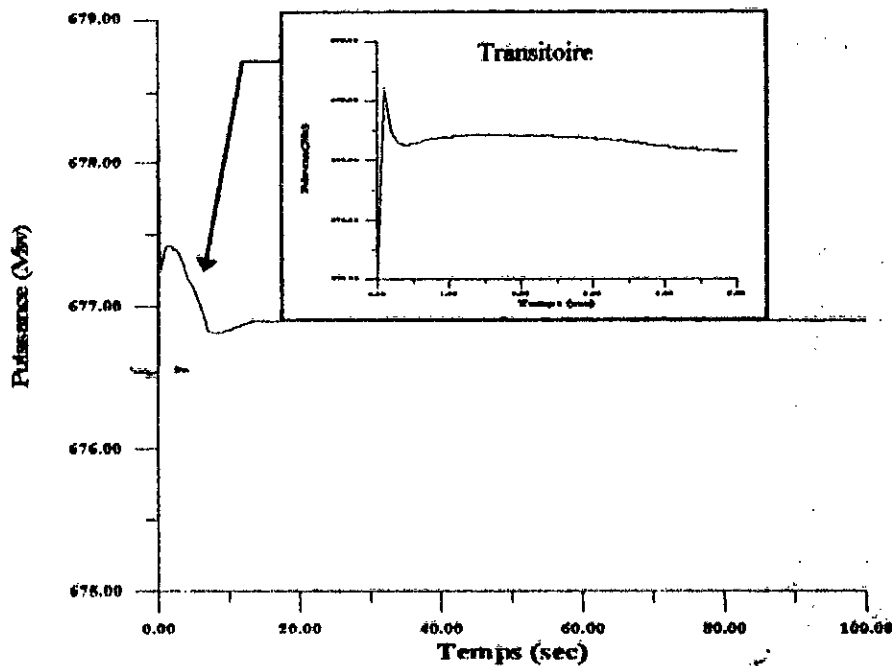
Le tableau ci-dessous présente les valeurs des états du système à deux points de fonctionnement différents. Pour notre simulation, nous avons choisi comme vecteur initial celui à 25% du fonctionnement nominal.

	P (Mw)	C1(Mw)	C2(Mw)	Tu(°C)	Tm(°C)
100 %	2700	2218960	336550	868.9	302.8
25 %	675	554741	84137	430.13	288.6

La figure (IV-b) présente l'évolution de la puissance suite à l'introduction d'un échelon de commande U=5 pcm (figureIV-a).

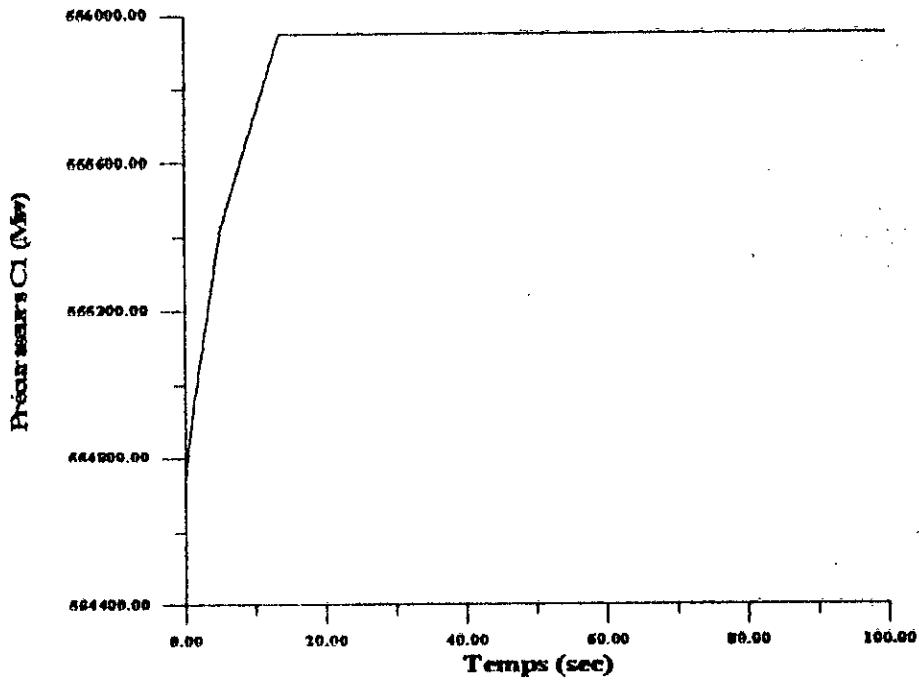


fig(IV.1.a): Echelon de commande

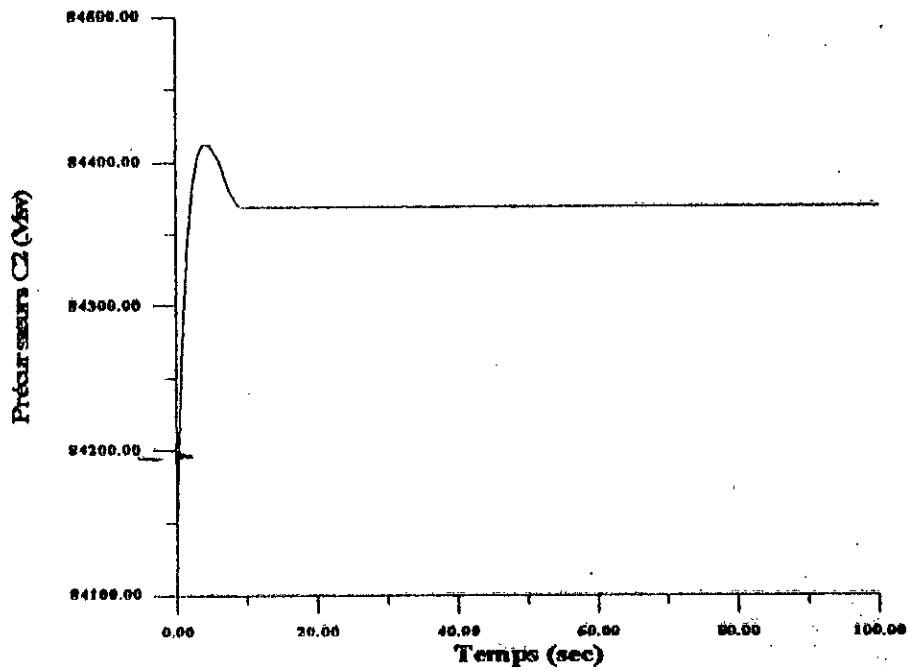


fig(IV.1.b): Evolution de la puissance

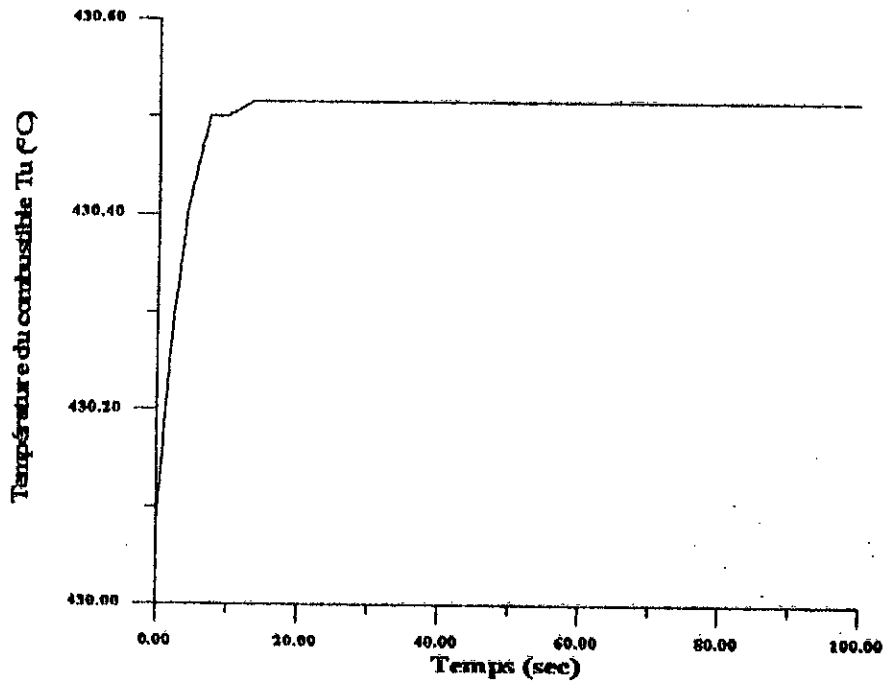
Les évolutions des autres états sont représentées sur les figures (IV.1.c à f). D'après ces figures, on peut dire que le système est stable pour ces conditions initiales.



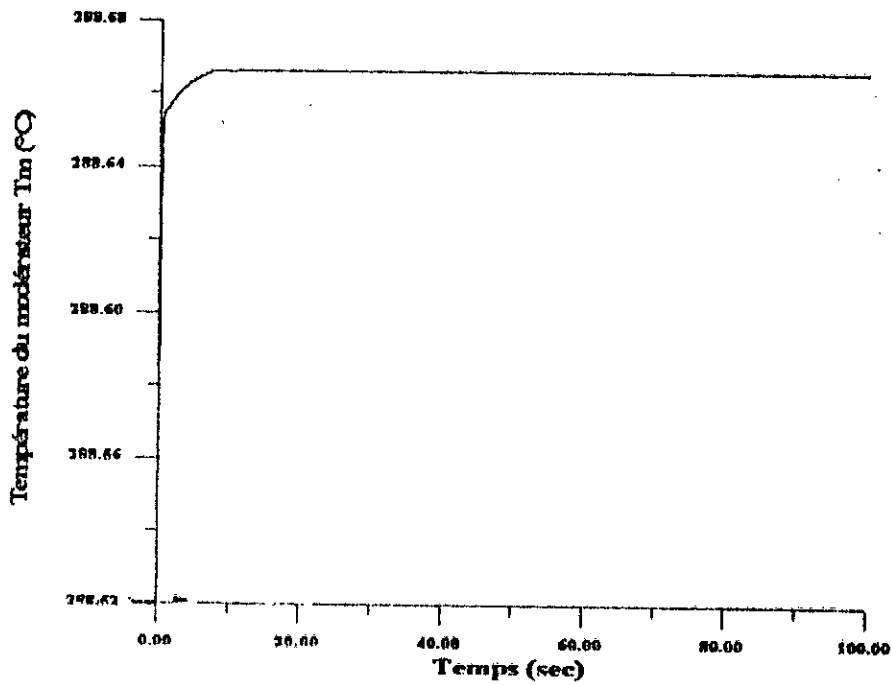
fig(IV.1.c): Evolution des Précurseurs C1



fig(IV.1.d): Evolution des Précurseurs C2



fig(IV.1.e): Evolution de la température du combustible  $T_u$ (°C)



fig(IV.1.f): Evolution de la température du modérateur  $T_m$ (°C)

### VI.3) Commande par PID:

Afin de faire la comparaison avec le GPC, nous avons synthétisé le PID à partir du modèle linéaire, d'une manière à avoir de bonnes performances pour ce dernier.

Les coefficients du PID sont choisis comme suit:

$k=252.1887$ ;  $T_i=2.1890$ ;  $T_d=0.6126$  pour assurer une marge de gain pour le système linéaire en boucle fermée égale à  $45^\circ$  et une pulsation de coupure égale à  $0.5(\text{rad})$ .

#### □ Cas sans perturbation:

Les figure(IV.2.a et b) représentent respectivement l'évolution de la température du modérateur (en  $^\circ\text{C}$ ) et la réactivité (en pcm).

L'erreur entre la sortie et la référence (en %)est représentée dans la figure (2.c).

On remarque que le PID n'assure pas une bonne poursuite et régulation quand il est appliqué au système non linéaire contrairement au cas du système linéaire.

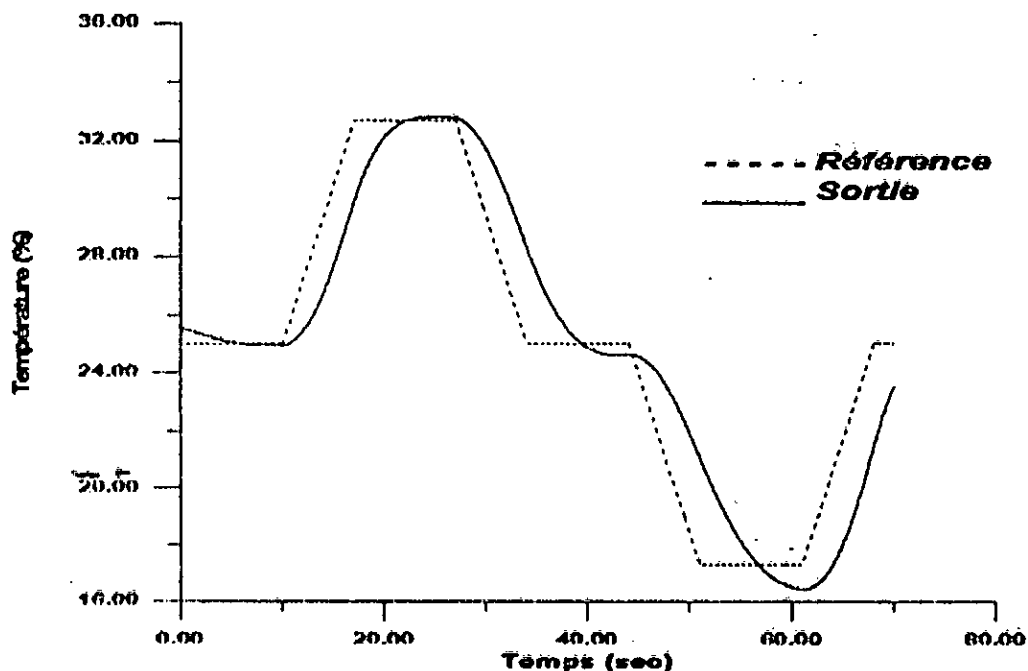


Fig.(IV.2.a): Évolution de la température du modérateur



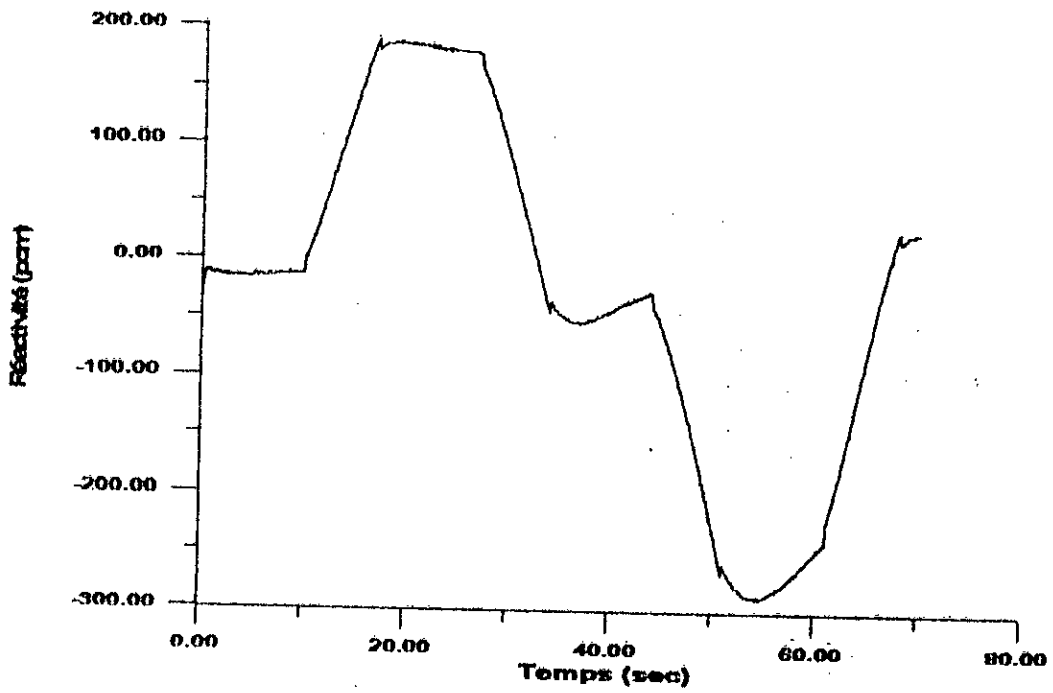


Fig.(IV.2.b): Evolution de la commande

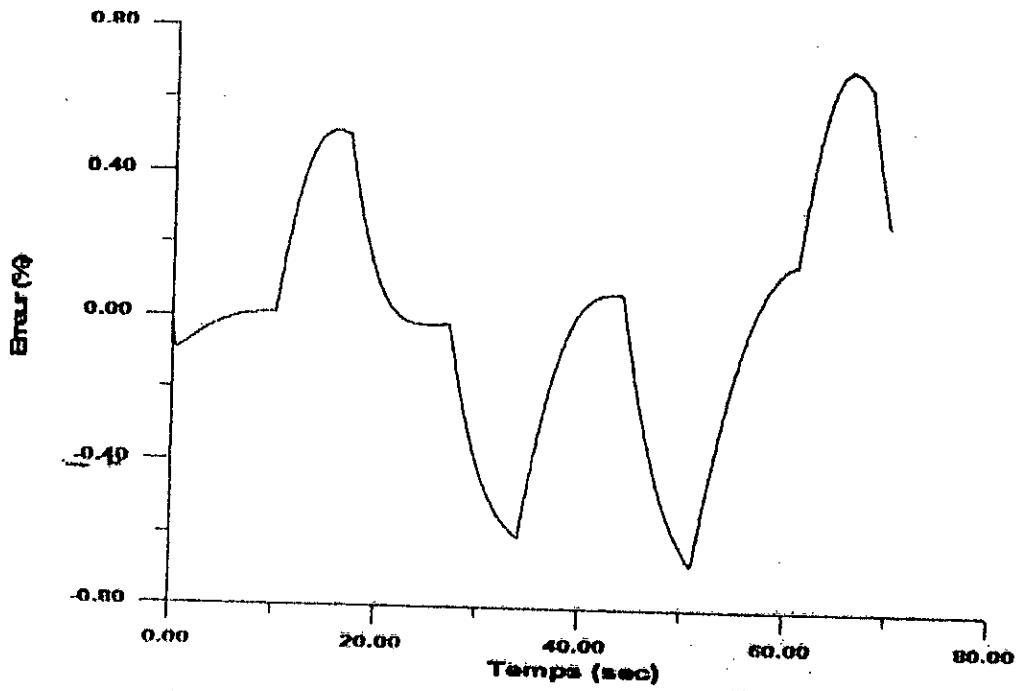


Fig.(IV.2.c): Evolution de l'erreur

**□ Cas avec perturbation:**

Los résultats de simulation sont indiqués sur les figures (IV.2.d et e).  
Pour simuler le comportement du système en boucle fermée, en présence de perturbations, une séquence de bruit aléatoire est appliquée au système.

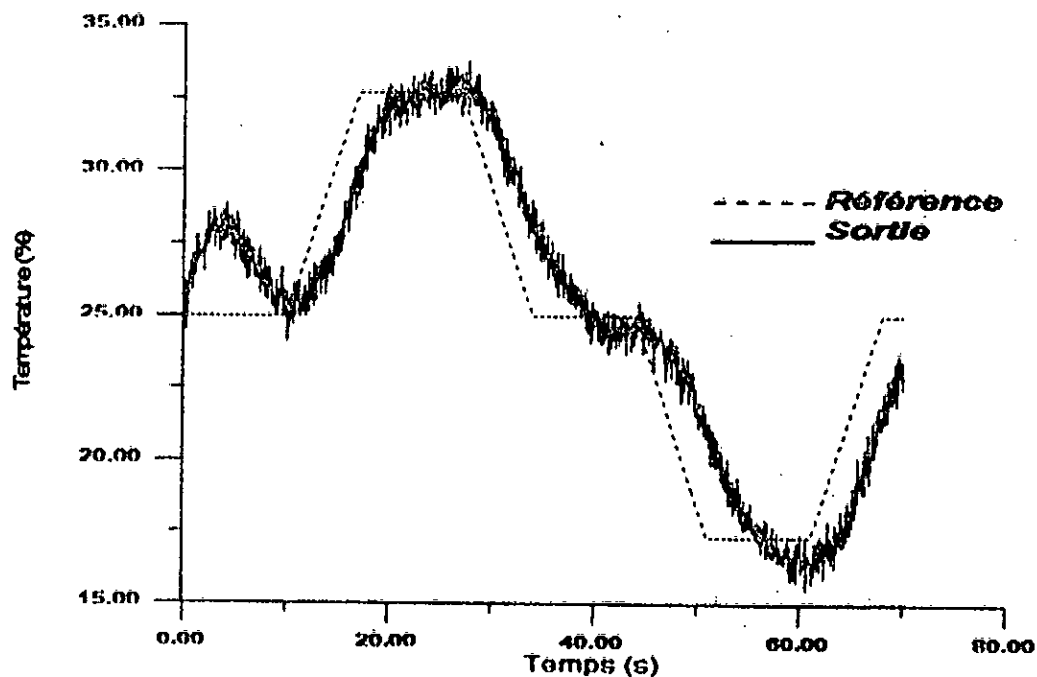


Fig.(IV.2.d): Evolution de la température du modérateur

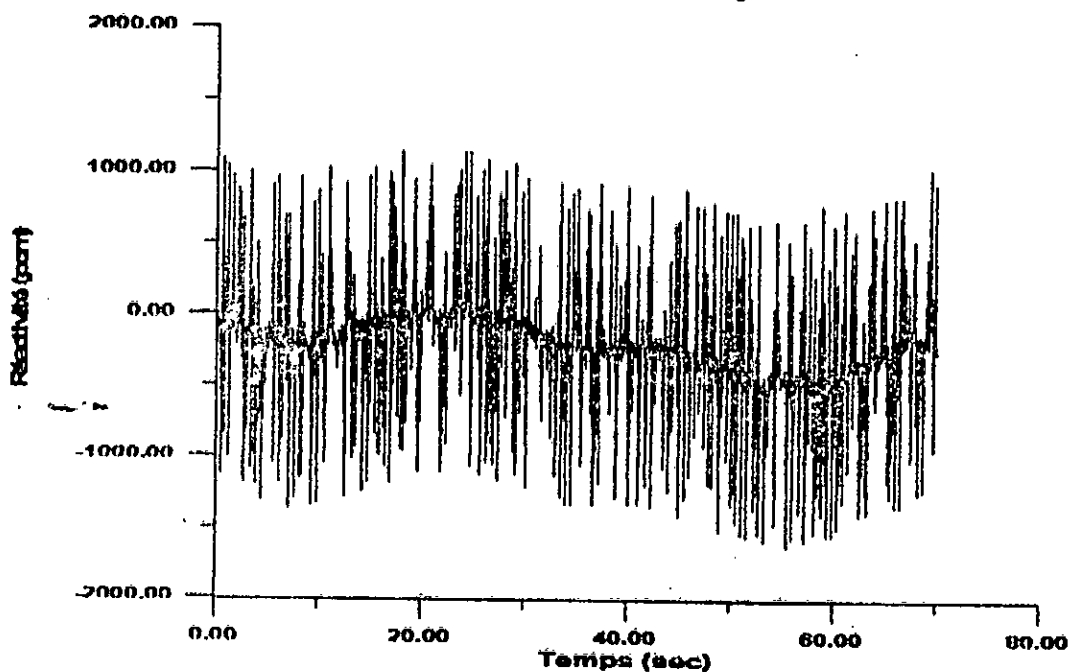


Fig.(IV.2.e): Evolution de la commande

On remarque que dans le cas du réglage avec un PID, l'application d'une perturbation a une grande influence sur la commande qui se manifeste par d'importantes variations (voir fig.(IV.2.e)).

L'erreur de suivi dans le cas avec perturbation est indiquée sur la figure (IV.2.f).

En conclusion, on peut dire que l'application d'un régulateur conventionnel PID au contrôle d'un réacteur PWR donne une mauvaise poursuite et régulation et une forte sensibilité aux perturbations.

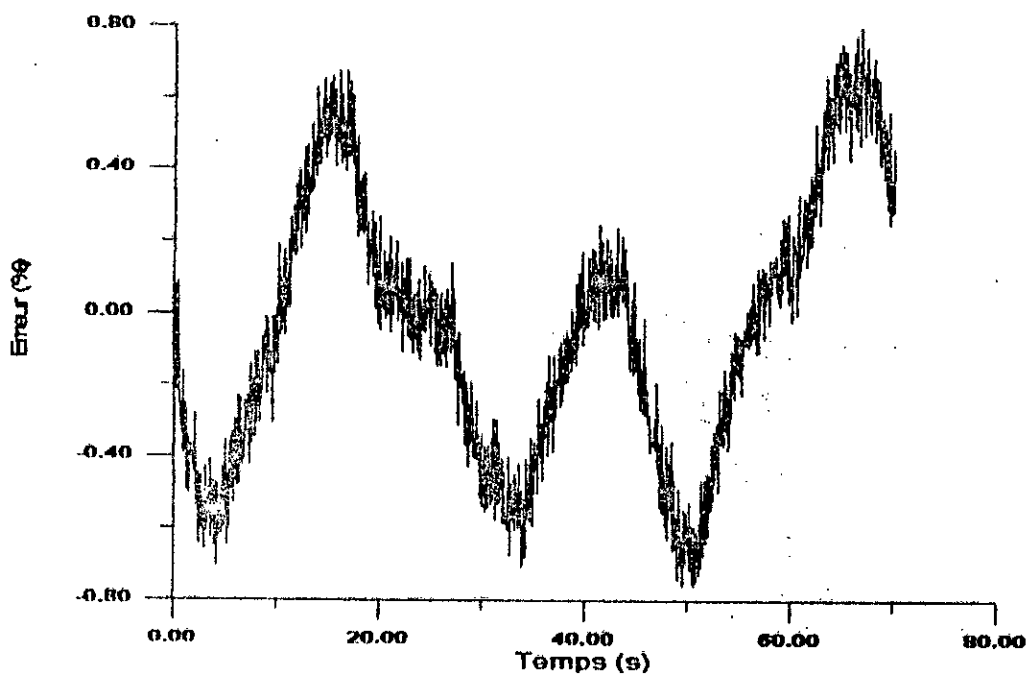


Fig.(IV.2.f): Evolution de l'erreur

#### IV.4) Commande prédictive généralisée:

##### IV.4.1) Initialisation:

Pour l'algorithme d'adaptation paramétrique nous avons utilisé les paramètres suivant:

Structure du modèle estimé:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + a_3 q^{-3}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}$$

*Le vecteur des paramètres:*

$$\theta(0) = [-2.6632, 2.3707, -0.7081, 0.05464, -0.7866, -0.1685]$$

Les paramètres de l'estimateur sont initialisés comme suit:

Gain initial = 0.5: le gain initial mesure l'éloignement des paramètres estimés par rapport aux valeurs initiales.

S'il n'y a pas d'informations initiales sur les paramètres, GI doit avoir une grande valeur (1000) et si l'estimation initiale des paramètres est disponible, comme dans notre cas, alors le gain doit avoir une petite valeur ( $\leq 1$ ).

La trace de la matrice de gain d'adaptation, c'est-à-dire  $\text{tr}(F(t))$ , est prise constante et égale à  $nGI$ , avec  $n=7$ .

La période d'échantillonnage pour toutes nos simulations est fixée égale à 100ms.

#### **IV.4.2) Application sur un modèle linéaire:**

Pour pouvoir tester l'influence de chaque paramètre de synthèse du GPC on a choisi de prendre comme exemple le modèle linéaire suivant:

$$(1 - 1.7 q^{-1} + 0.9 q^{-2}) y(t) = (1 + 2 q^{-1}) u(t-1)$$

Les figures (IV.3.a et b), représentent la sortie et la commande du système pour les paramètres de synthèse suivants:

$$h_p=8, h_i=1, h_c=1 \text{ et } \lambda = 6 \cdot 10^{-5}.$$

Ce choix nous a permis de bonnes performances en poursuite et en régulation.

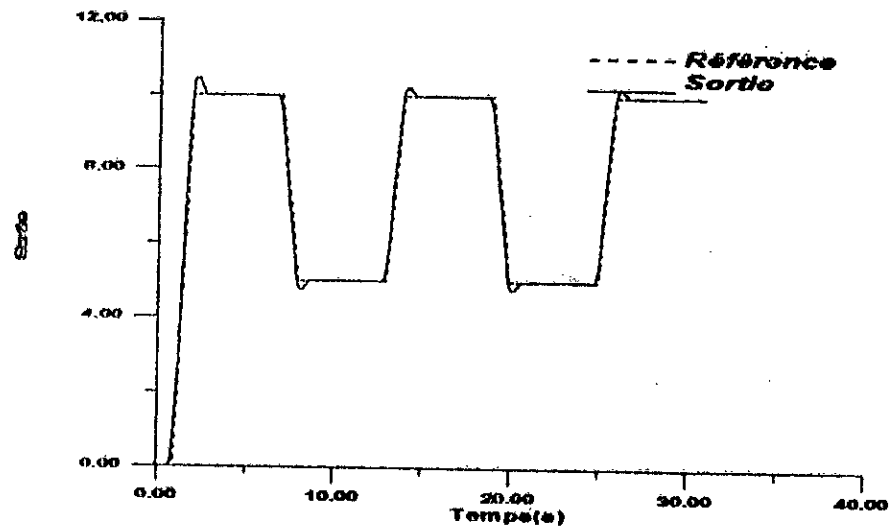


Fig.(IV.3.a): Evolution de la sortie

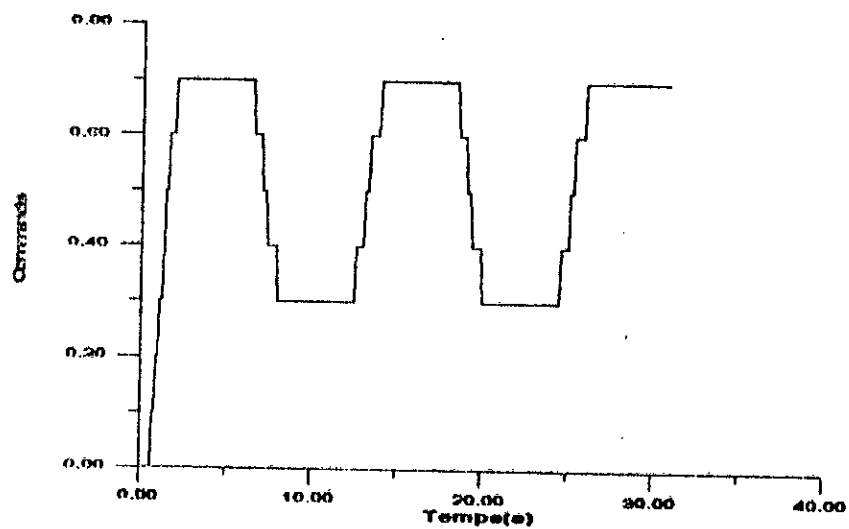


Fig.(IV.3.b): Evolution de la commande

Les figures (IV.4.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les mêmes valeurs de  $h_i$ ,  $h_c$ , et  $\lambda$  mais avec  $h_p = 4$ .

On remarque bien que ce choix de la valeur de  $h_p$  ne donne pas de meilleurs résultats à cause de la petite valeur de l'horizon de prédiction. Ceci est expliqué par la présence d'une erreur de poursuite avec des oscillations aux débuts de chaque palier.

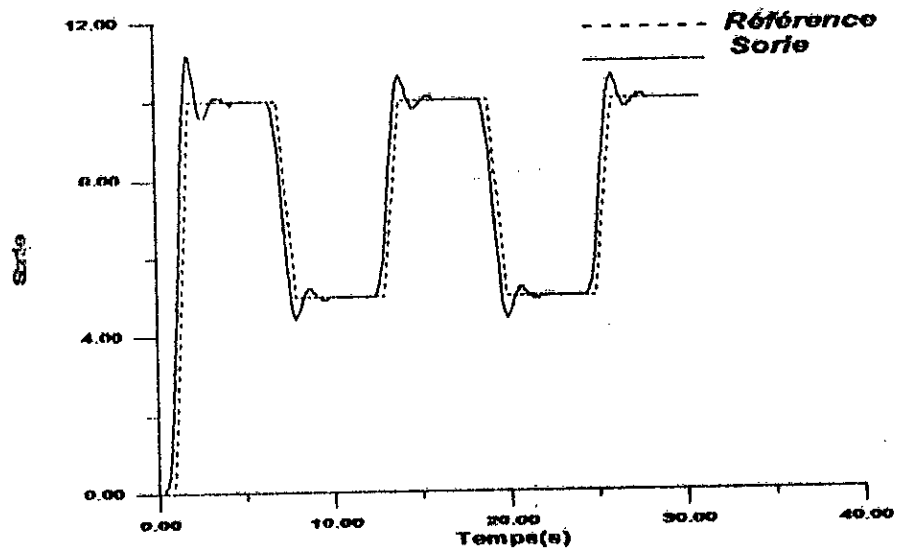


Fig.(IV.4.a): Evolution de la sortie

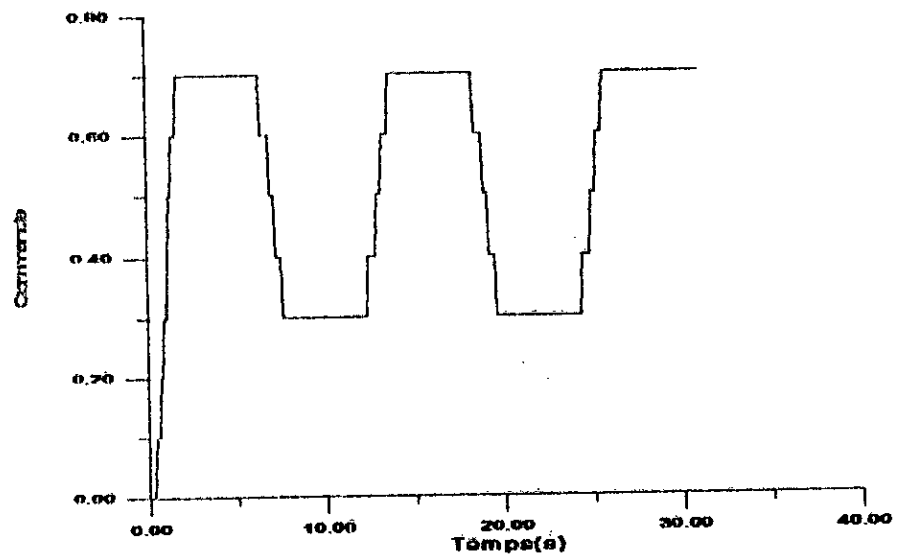


Fig.(IV.4.b): Evolution de la commande

Les figures (IV.5.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les mêmes valeurs de  $h_i$ ,  $h_c$ , et  $\lambda$  mais avec  $h_p = 10$ .

On remarque que la valeur de  $h_p$  donne, dans ce cas aussi, de mauvaises performances. Donc la valeur de  $h_p$  doit être choisie dans un intervalle bien spécifié.

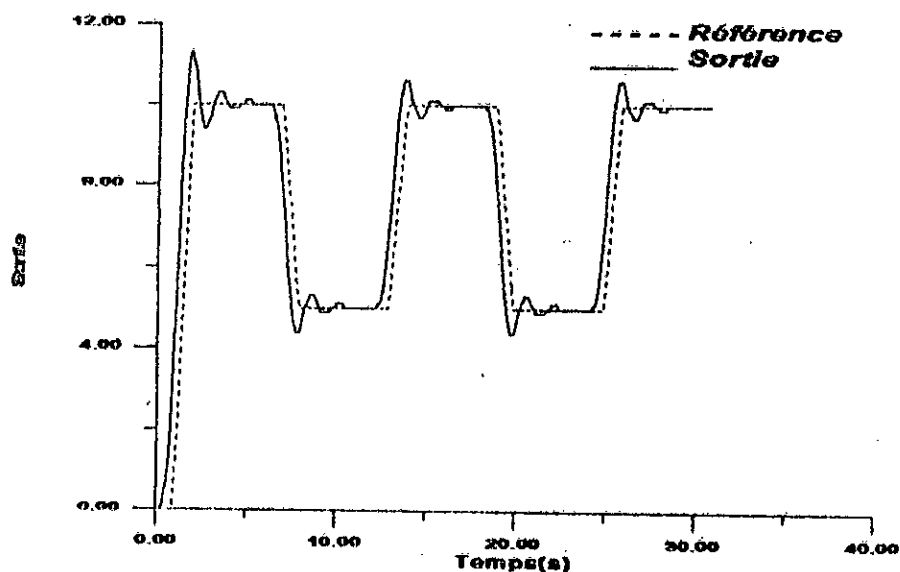


Fig.(IV.5.a): Evolution de la sortie

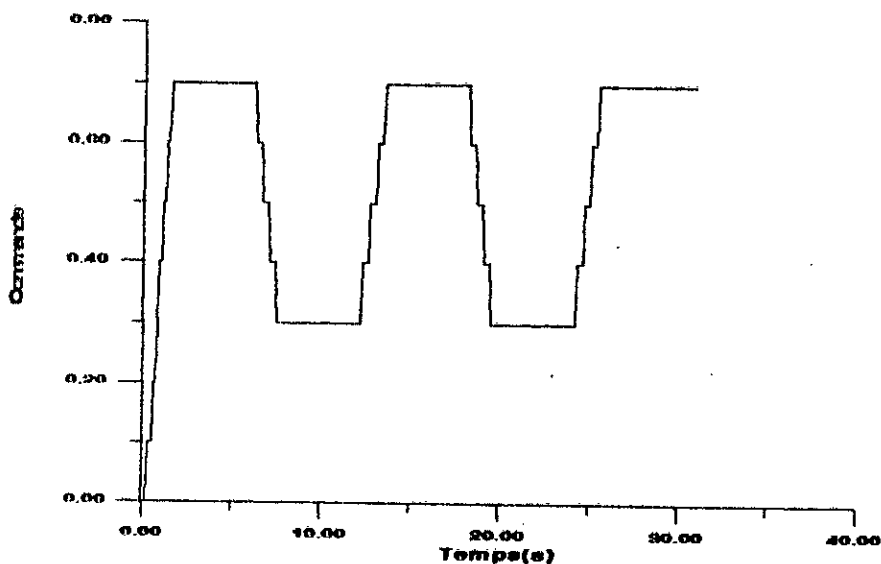


Fig.(IV.5.b): Evolution de la commande

Afin de voir l'influence du coefficient  $h_i$ , nous avons présenté les résultats de simulation pour  $h_i = 3$ ,  $h_p = 8$ ,  $h_c = 1$ ,  $\lambda = 1.E-5$ .

Ces résultats sont indiqués sur les figures (IV.6.a et b).

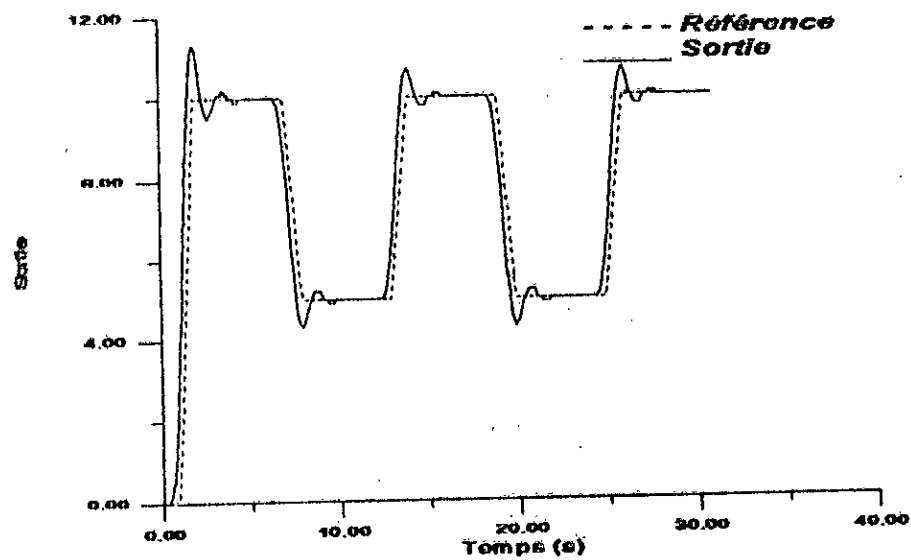


Fig.(IV.6.a): Evolution de la sortie

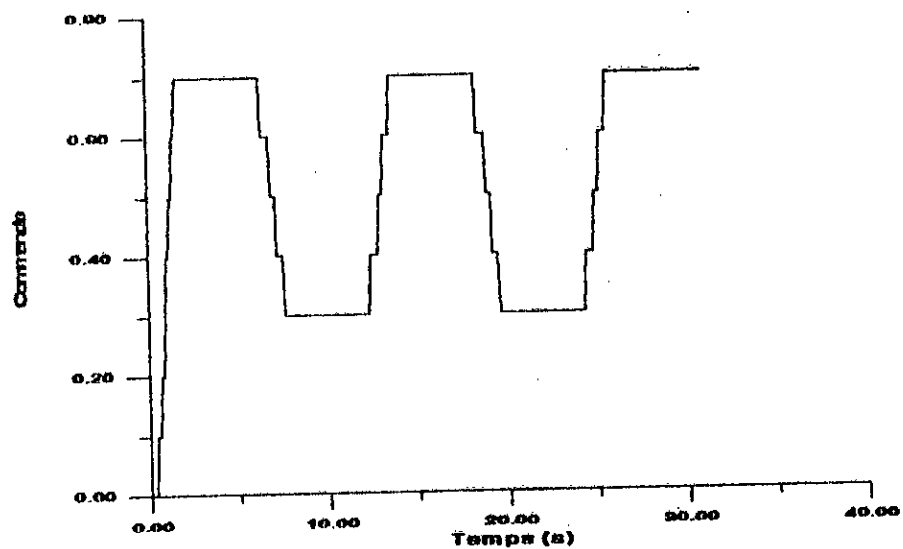


Fig.(IV.6.b): Evolution de la commande

Les figures (IV.7.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les mêmes valeurs de  $h_p$ ,  $h_c$ , et  $\lambda$  mais avec  $h_i = 6$ .

On remarque que pour une grande valeur de  $h_i$ , la sortie présente des oscillations au début de chaque palier et une erreur initiale de plus en plus grande.



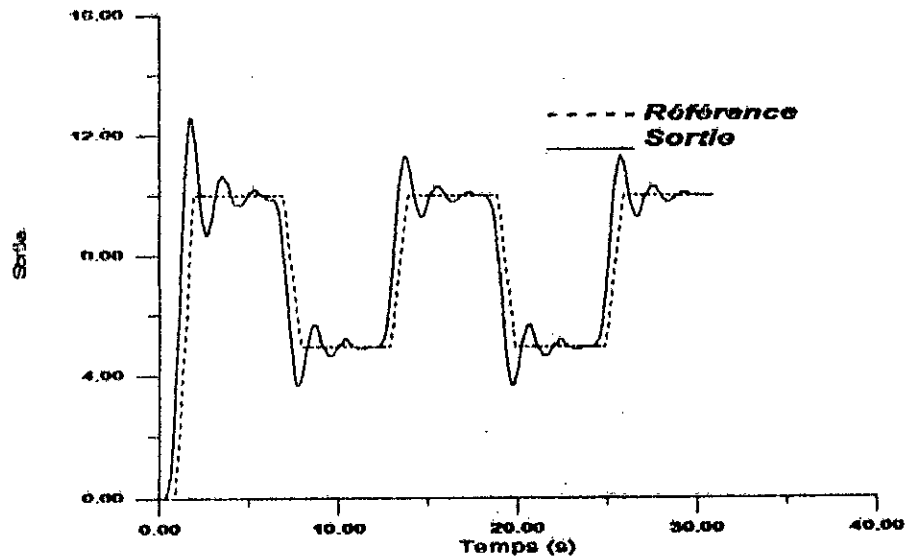


Fig.(IV.7.a): Evolution de la sortie

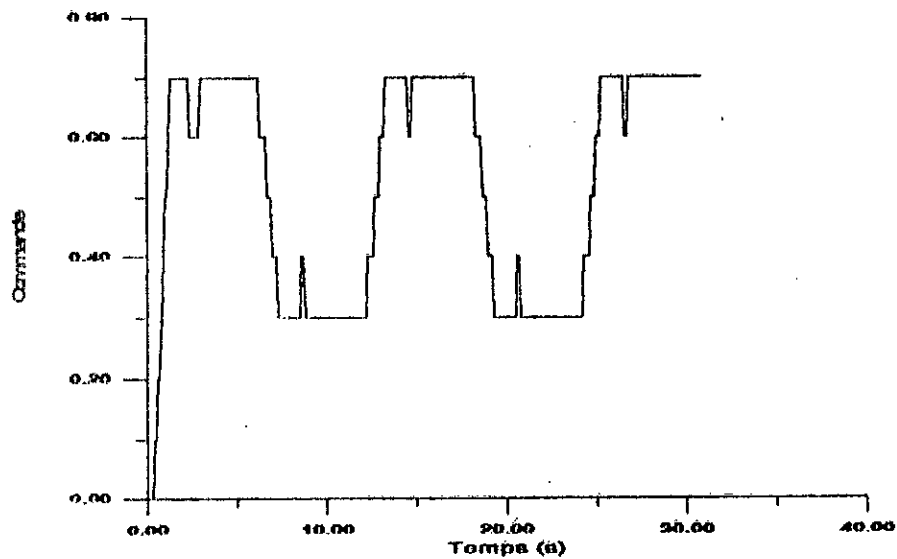


Fig.(IV.7.b): Evolution de la commande

Une augmentation de la valeur de  $\lambda$  provoque une dégradation des performances du système, ce qui est représenté sur les figures (IV.8.a et b) avec:

$h_p = 8$ ,  $h_i = 1$ ,  $h_c = 1$  et  $\lambda = 5.E-2$ . De même, les résultats obtenus pour la valeur de  $\lambda = 4.E-7$ , sont moins performants (figures (IV.9.a et b)). Donc  $\lambda$  doit être choisi judicieusement en fonction du gain du système.

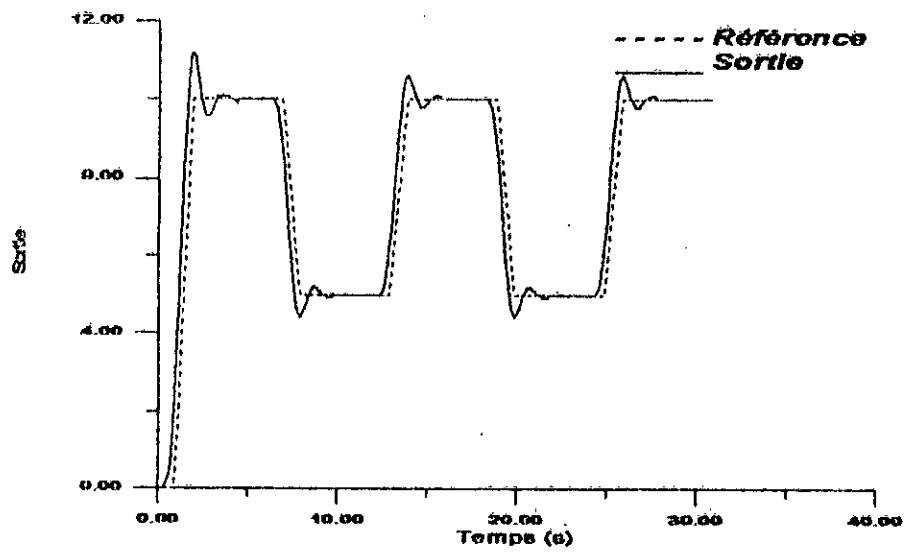


Fig.(IV.8.a): Evolution de la sortie

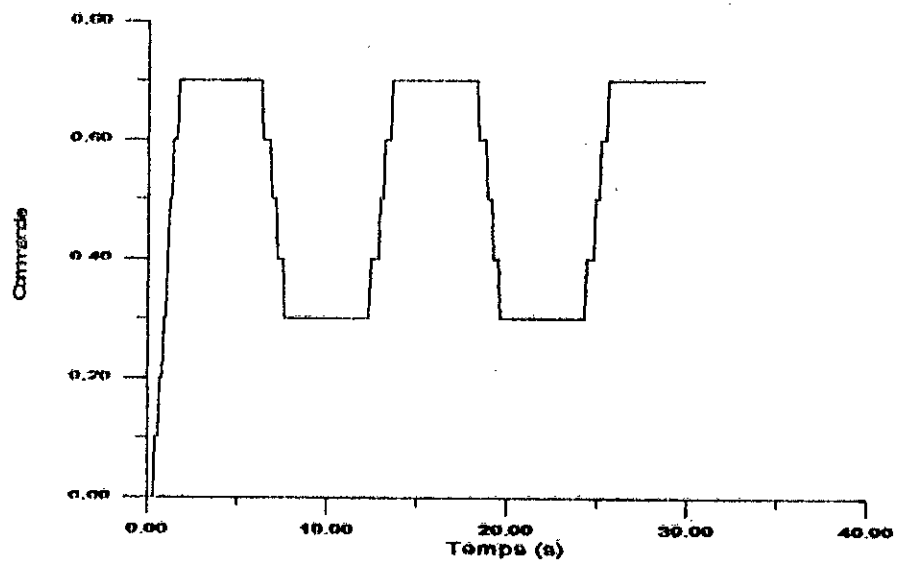


Fig.(IV.8.b): Evolution de la commande

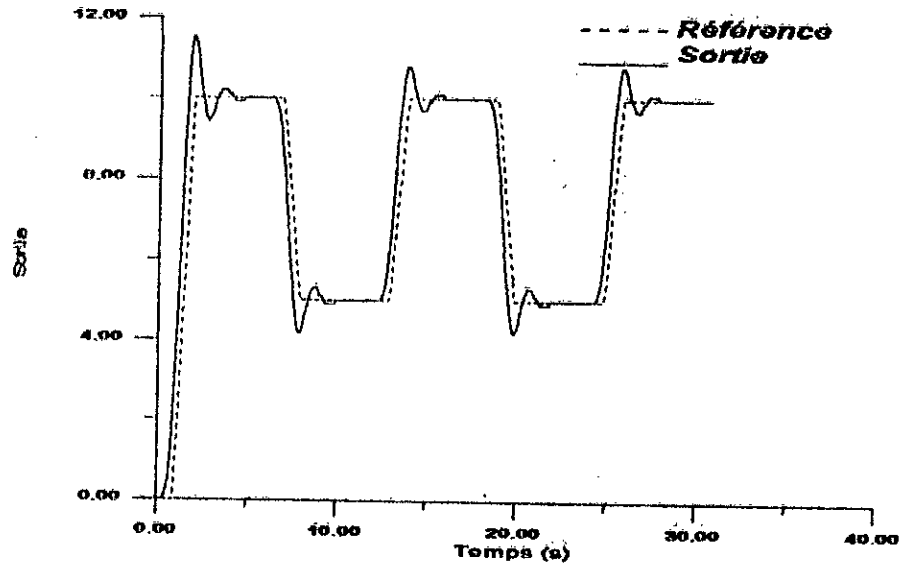


Fig.(IV.9.a): Evolution de la sortie

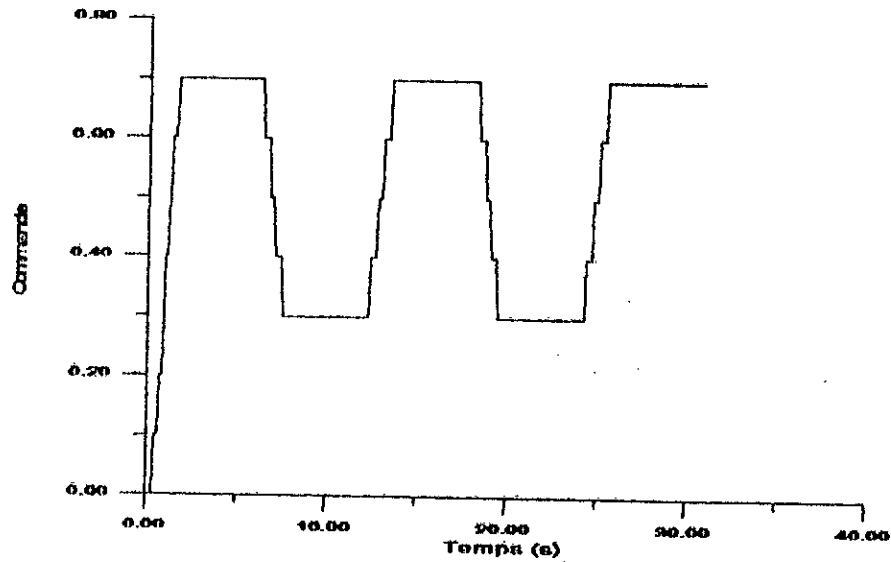


Fig.(IV.9.b): Evolution de la commande

#### IV.4.2) Application sur le modèle du réacteur :

##### □ Cas sans perturbation:

On initialise les paramètres de synthèse comme suit:

$$h_p = 8, h_i = 1, h_c = 1, \lambda = 3.5E-5, GI = 0.5.$$

Les figures (IV.10.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les valeurs initiales des paramètres de synthèse. Comme on peut le constater, pour ce choix des paramètres, le GPC assure une bonne poursuite et régulation.

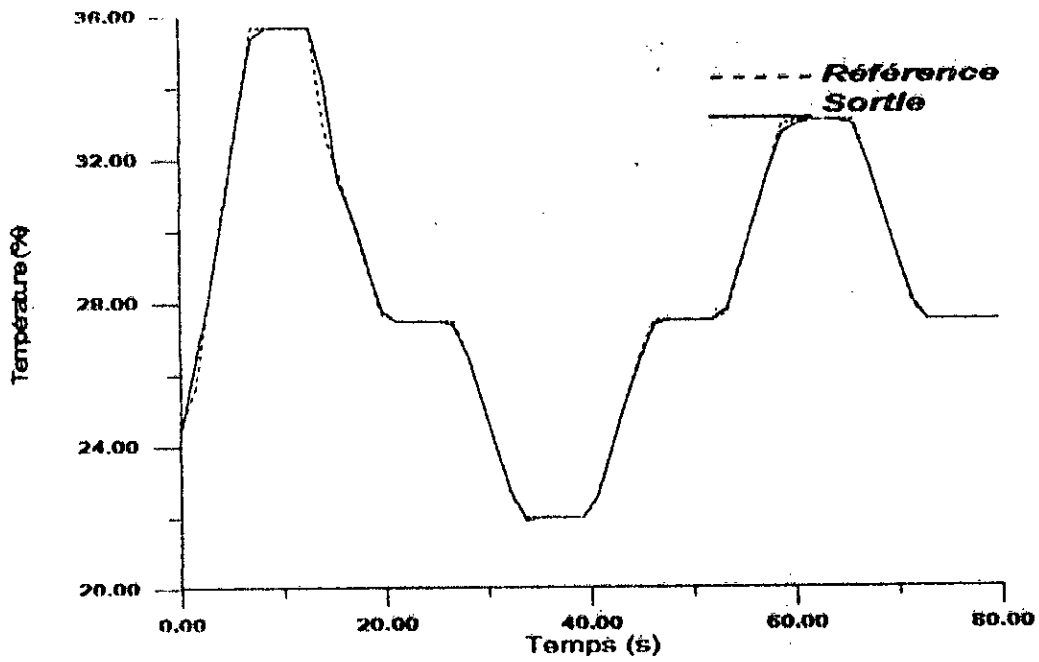


Fig.(IV.10.a): Evolution de la Température du modérateur

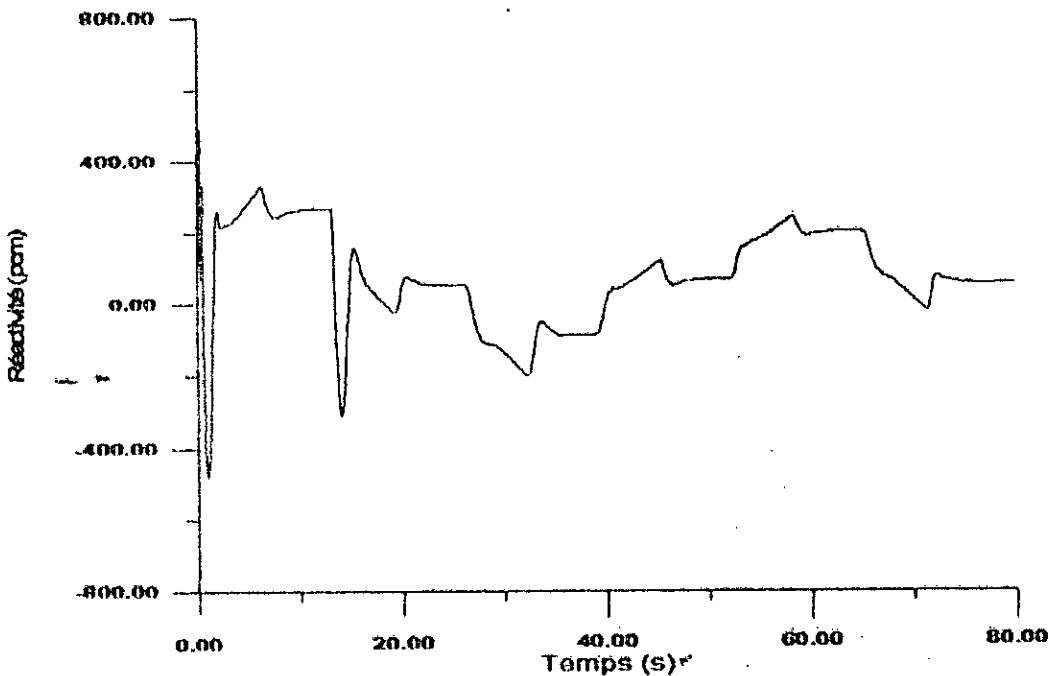


Fig.(IV.10.b): Evolution de la commande

L'erreur entre la sortie et la référence est indiquée sur la figure (IV.10.c). Cette erreur, après le transitoire d'adaptation, tend vers une très faible valeur.

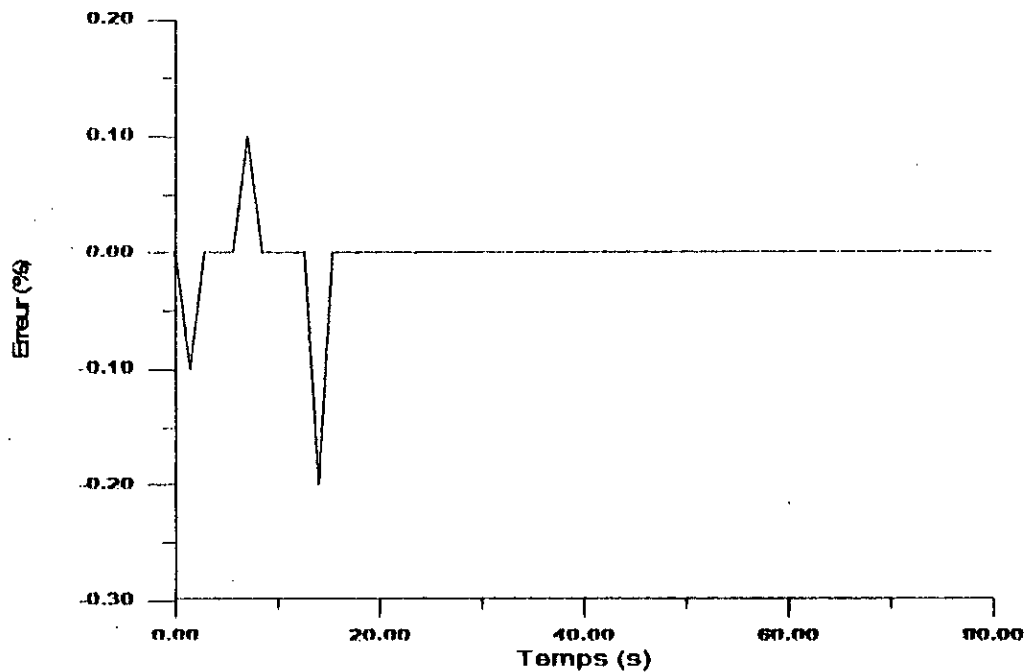


Fig.(IV.10.c): Evolution de l'erreur

Les figures (IV.10.d à f) indiquent respectivement l'évolution des paramètres  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$ . L'évolution des paramètres  $b_0$ ,  $b_1$  et  $b_2$  est montrée sur les figures (IV.10.g à i). Ces paramètres ne varient pas d'une manière considérable avec les changements de consigne, ce qui prouve la robustesse de l'algorithme à trace constante utilisé.

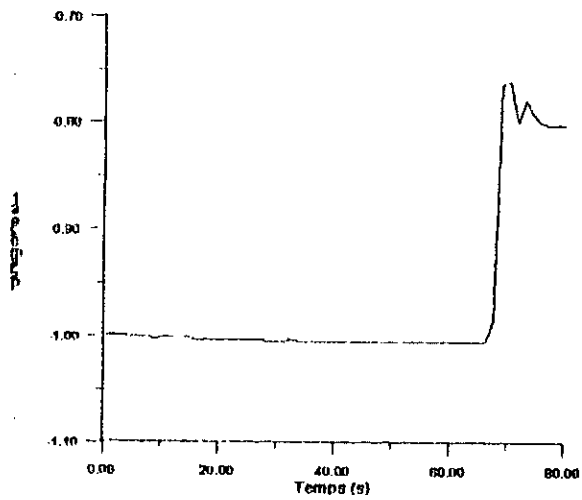


Fig.(IV.10.d): Evolution du paramètre a1

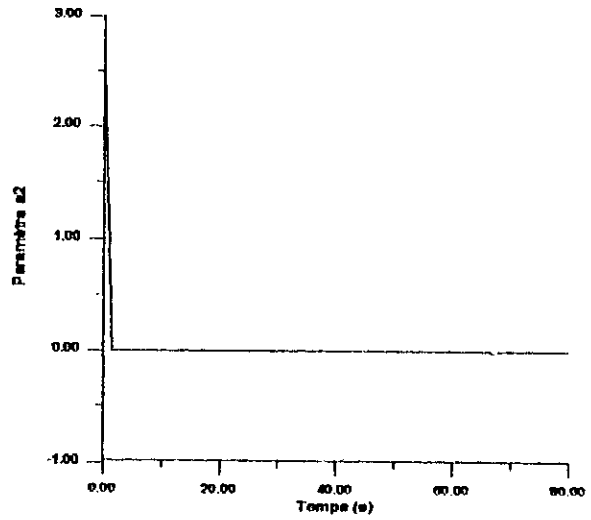


Fig.(IV.10.e): Evolution du paramètre a2

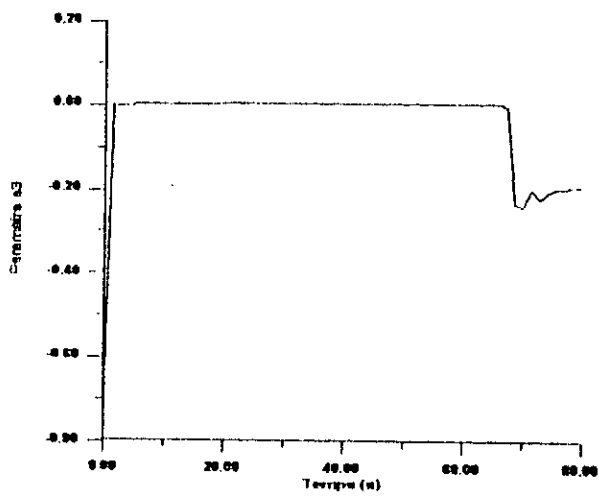


Fig.(IV.10.f): Evolution du paramètre a3

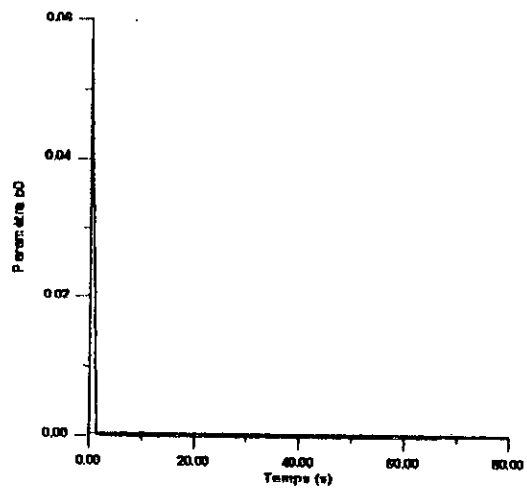


Fig.(IV.10.g): Evolution du paramètre b0

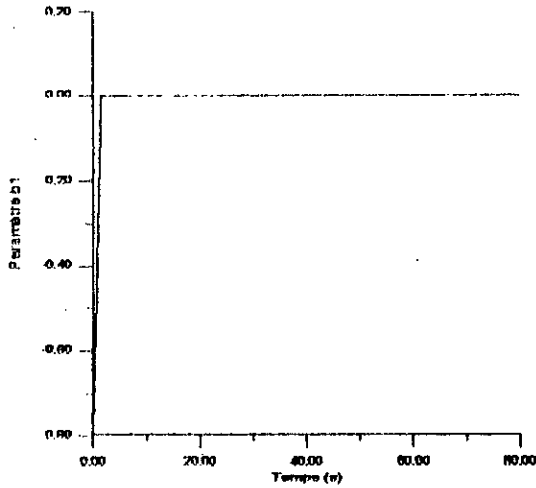


Fig.(IV.10.h): Evolution du paramètre b1

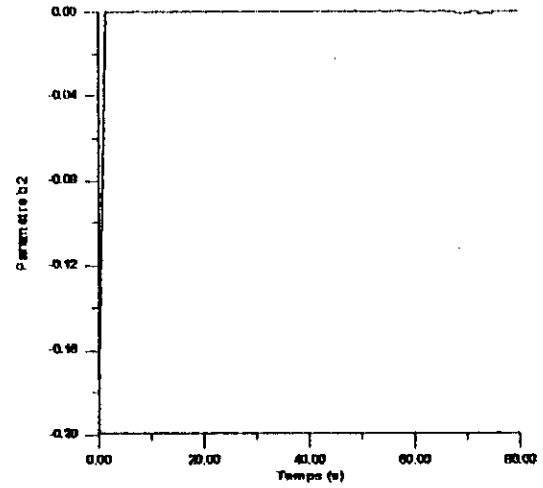


Fig.(IV.10.i): Evolution du paramètre b2

Les figures (IV.11.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les paramètres de synthèse suivants:

$$h_p=5, h_i=1, h_c=1 \text{ et } \lambda = 3.5 \text{ E-}5.$$

Cette diminution de la valeur de l'horizon de prédiction, comme on peut le remarquer, introduit des oscillations donc une dégradation de la qualité de poursuite.

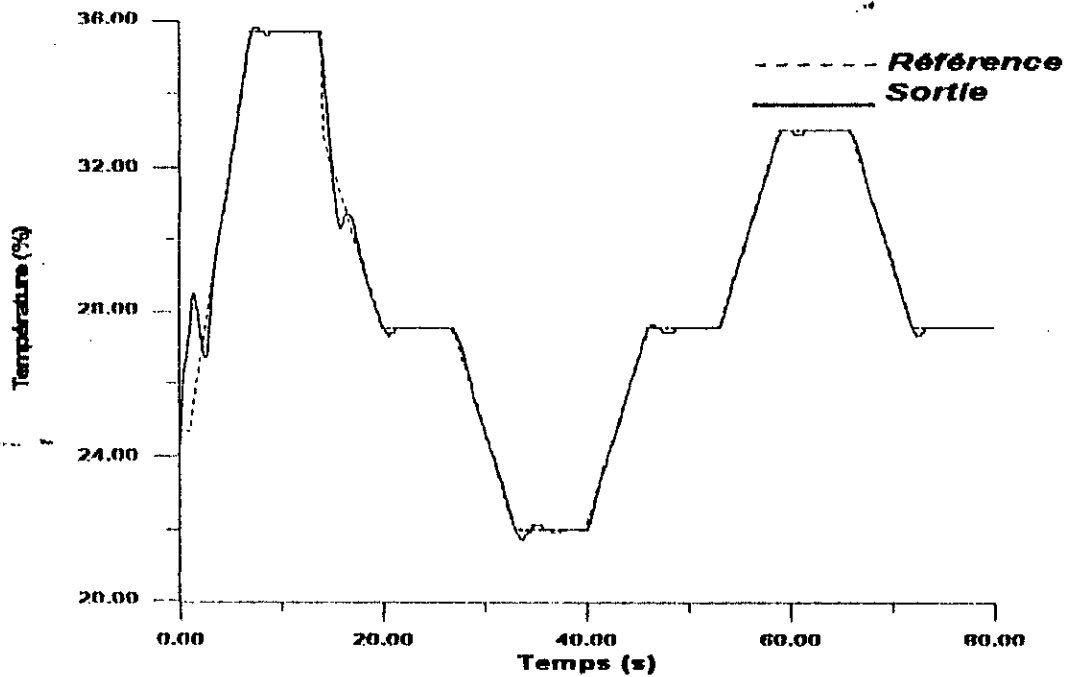


Fig.(IV.11.a): Evolution de la Température du modérateur

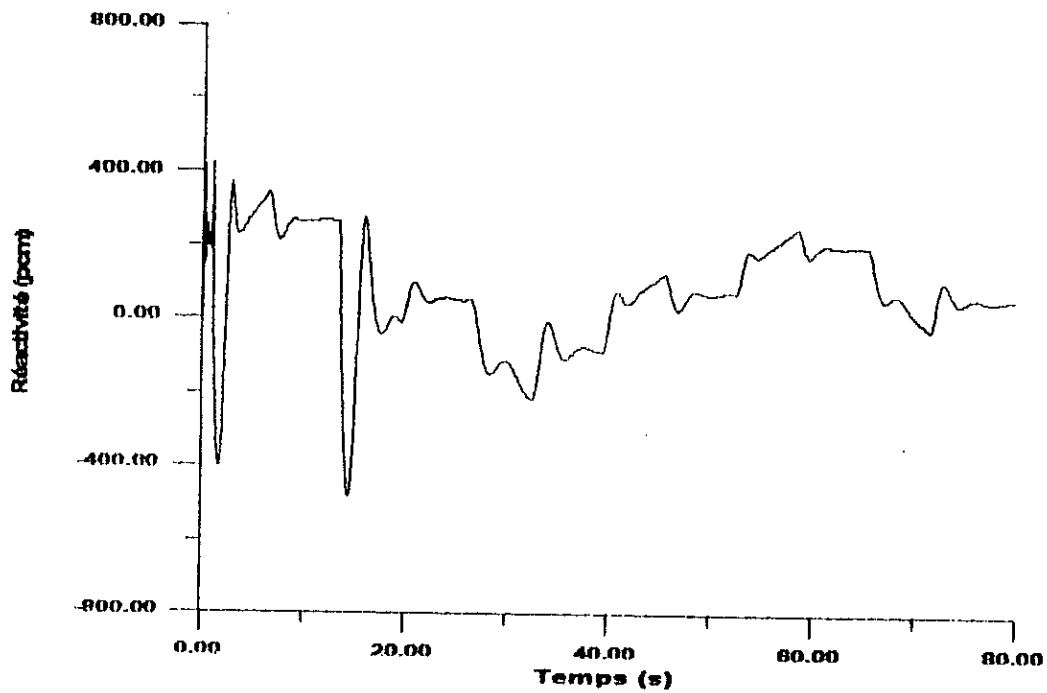


Fig.(IV.11.b): Evolution de la commande

L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (IV.11.c). On constate que l'amplitude de l'erreur est plus significative que dans le cas précédent mais qui devient presque nulle après le transitoire d'adaptation.



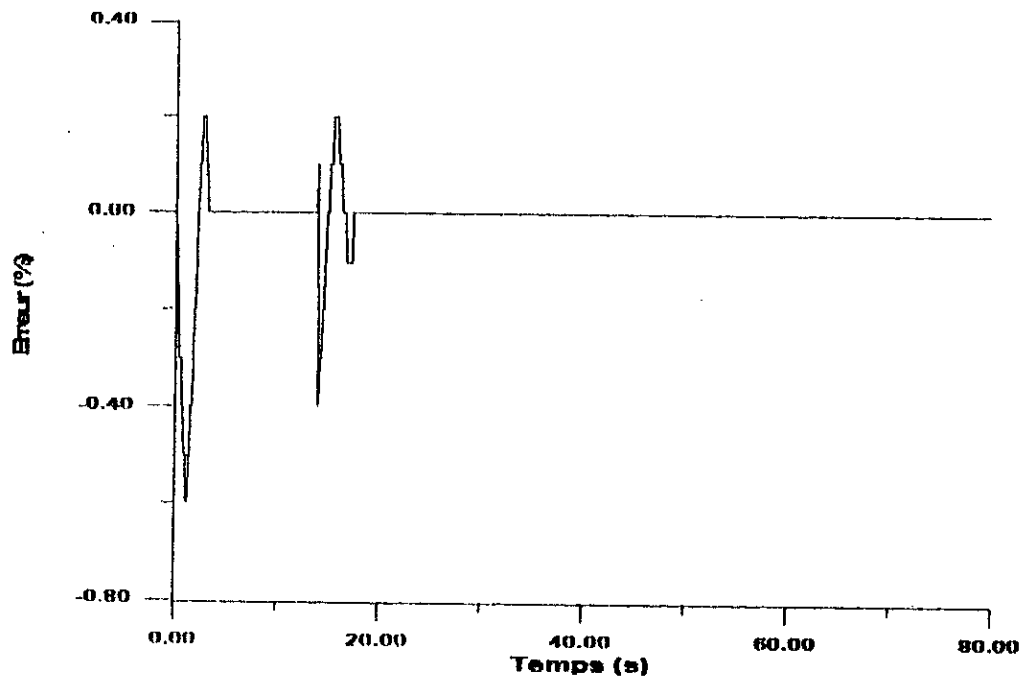


Fig.(IV.11.c): Evolution de l'erreur

Afin de voir l'influence du coefficient  $h_i$ , nous avons diminué la valeur de  $h_i$ , les figures (IV.12.a et b) représentent la sortie et la commande du système pour les paramètres de synthèse suivants:

$$h_p=8, h_i=3, h_c=1 \text{ et } \lambda =6. E-5.$$

Dans ce cas l'erreur initiale est devenue plus grande, donc il est préférable que  $h_i$  ait la valeur la plus petite assurant les meilleures performances.

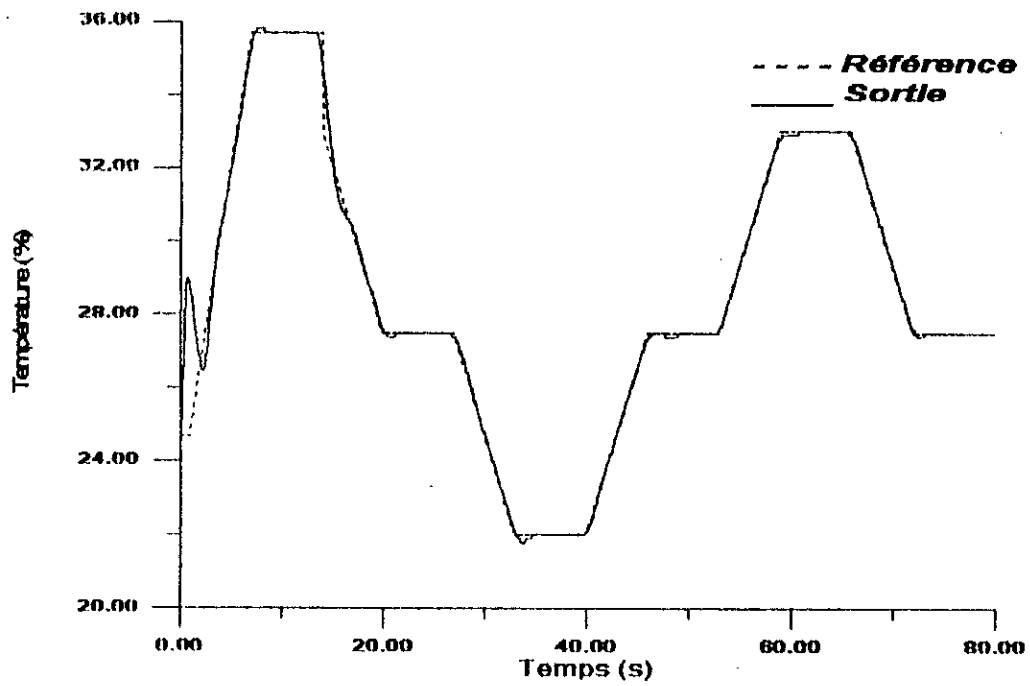


Fig.(IV.12.a): Evolution de la Température du modérateur

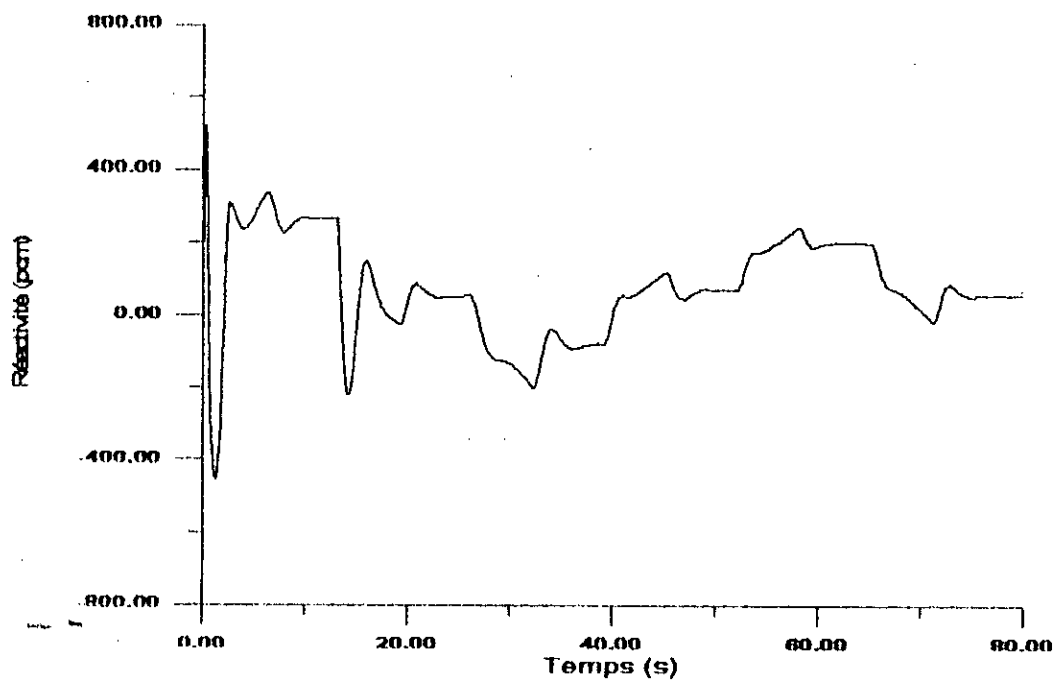


Fig.(IV.12.b): Evolution de la commande

L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (IV.12.c). Cette erreur tend vers une faible valeur après un transitoire d'adaptation pendant lequel l'amplitude de l'erreur est plus importante.

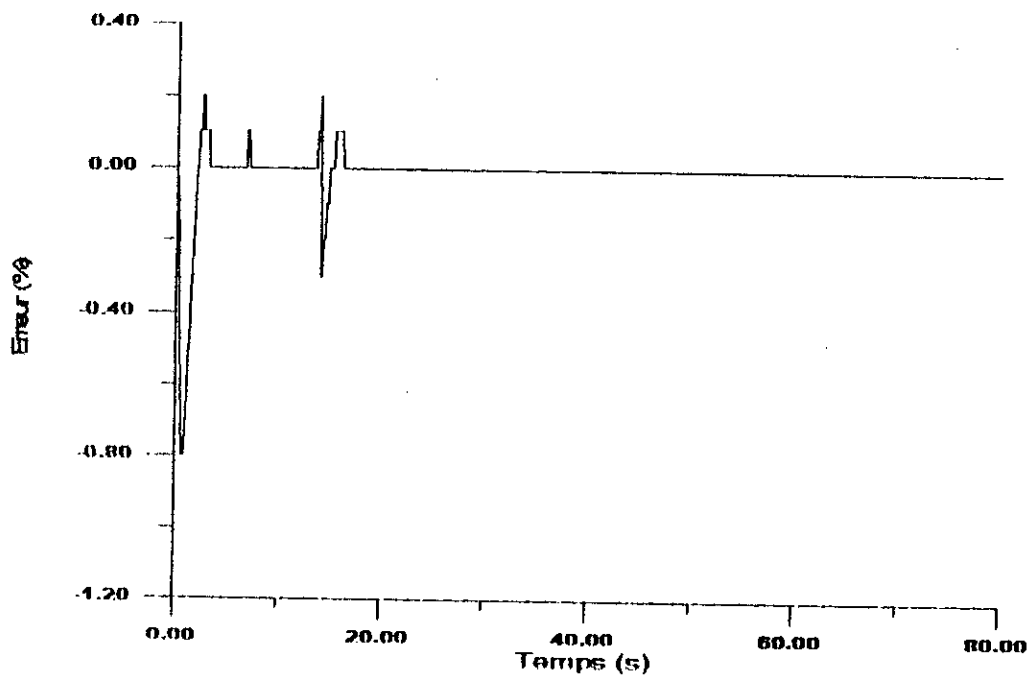


Fig.(IV.12.c): Evolution de l'erreur

Nous avons présenté les résultats de simulation pour une plus grande valeur de l'horizon initial ( $h_i = 6$ ), les autres paramètres sont choisis comme suit:

$$h_p = 8, h_c = 1, \text{ et } \lambda = 1.E-5.$$

Ces résultats sont indiqués sur les figures (IV.13.a et b). On remarque alors que les oscillations deviennent de plus en plus importantes sur le premier palier.

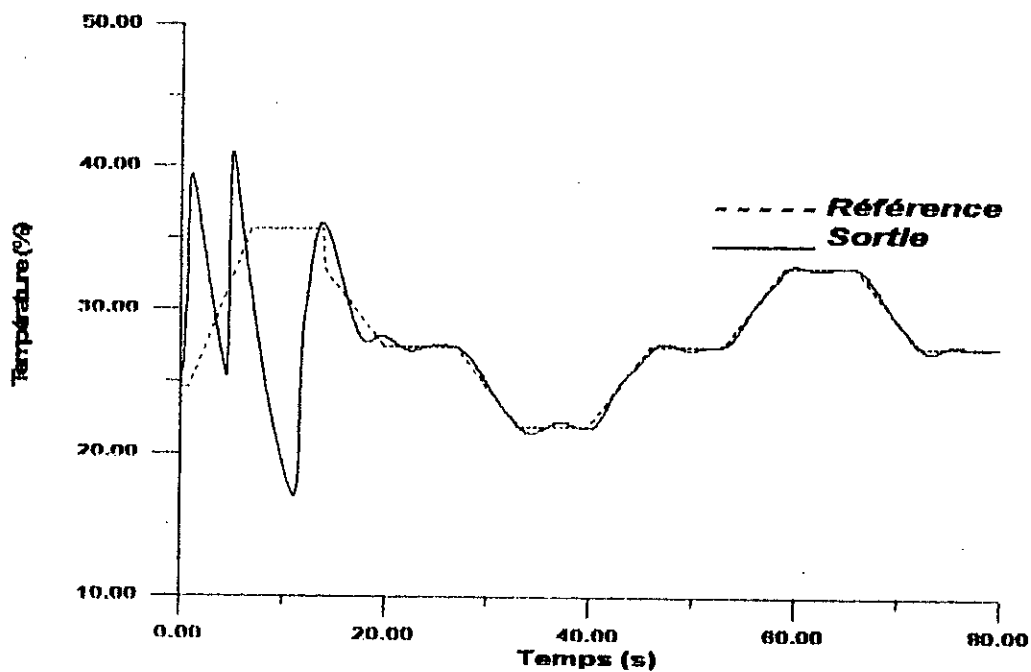


Fig.(IV.13.a): Evolution de la Température du modérateur

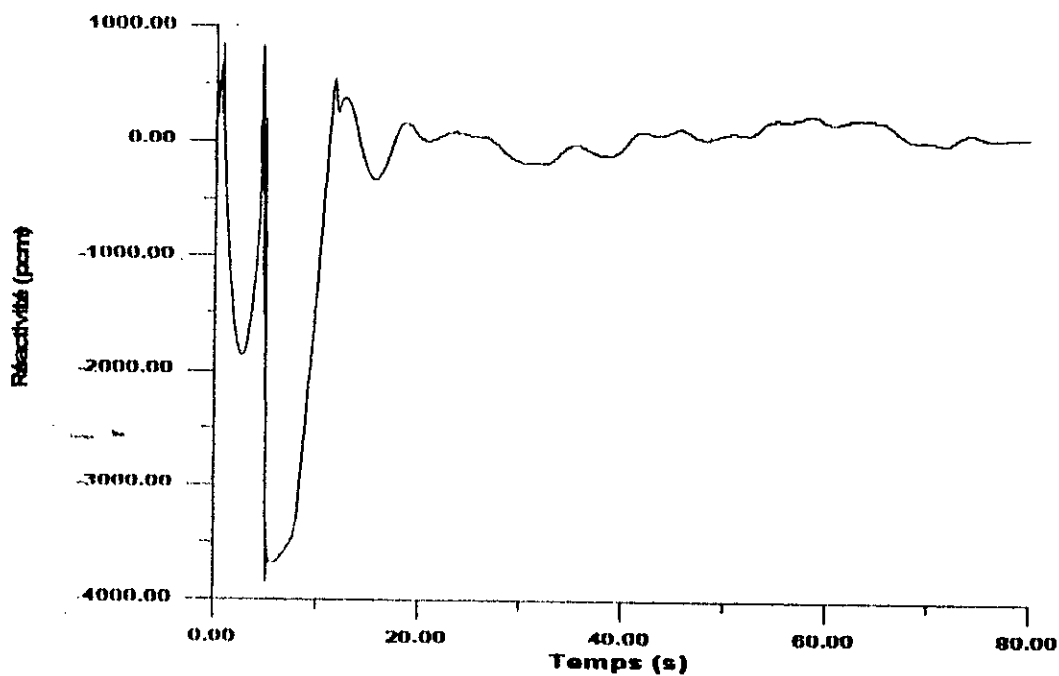


Fig.(IV.13.b): Evolution de la commande

L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (IV.13.c). On voit bien que cette erreur est importante durant le transitoire d'adaptation. De plus on constate que l'erreur de poursuite, contrairement à ce qu'on a obtenu précédemment, est cette fois-ci un peu plus importante.

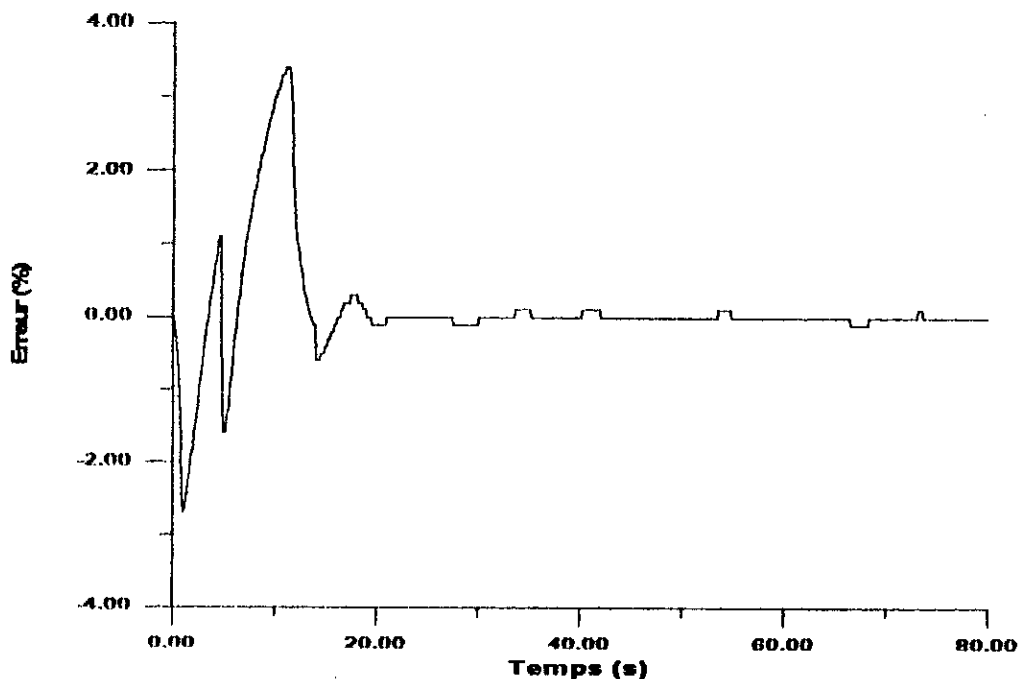


Fig (IV.13.c): Evolution de l'erreur

Une augmentation de la valeur de  $\lambda$  provoque une dégradation des performances du système, ce qui est représenté sur les figures (IV.14.a et b) avec:  $h_p = 8$ ,  $h_i = 1$ ,  $h_c = 1$  et  $\lambda = 5.E-4$ . Cette augmentation a provoqué une diminution de la qualité de régulation (oscillations) et une mauvaise poursuite.

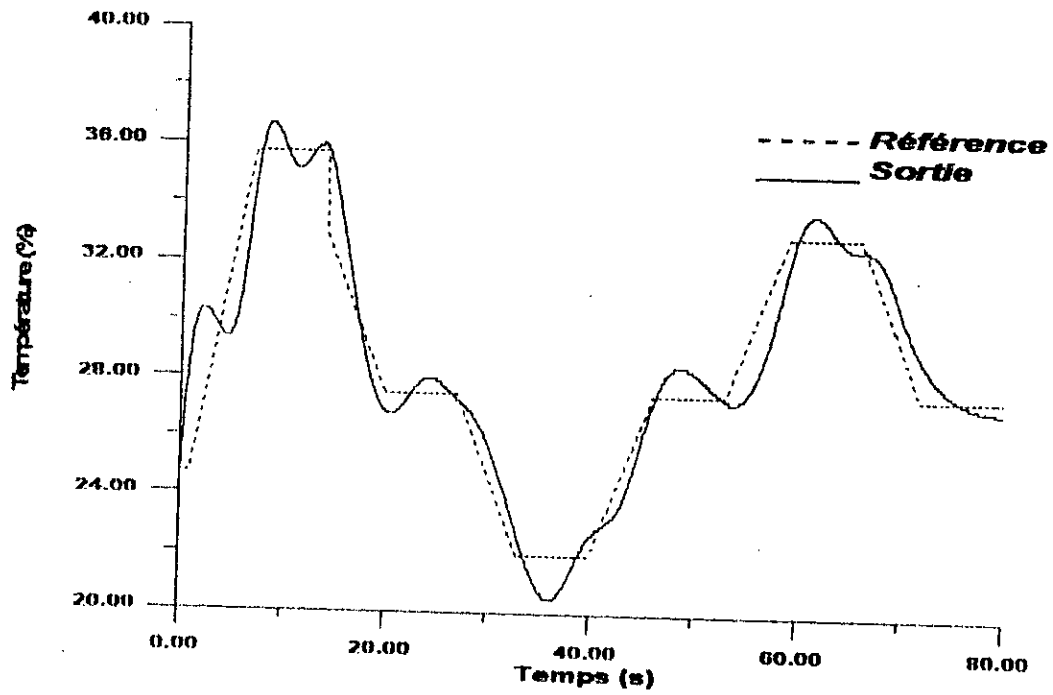


Fig.(IV.14.a): Evolution de la Température du modérateur

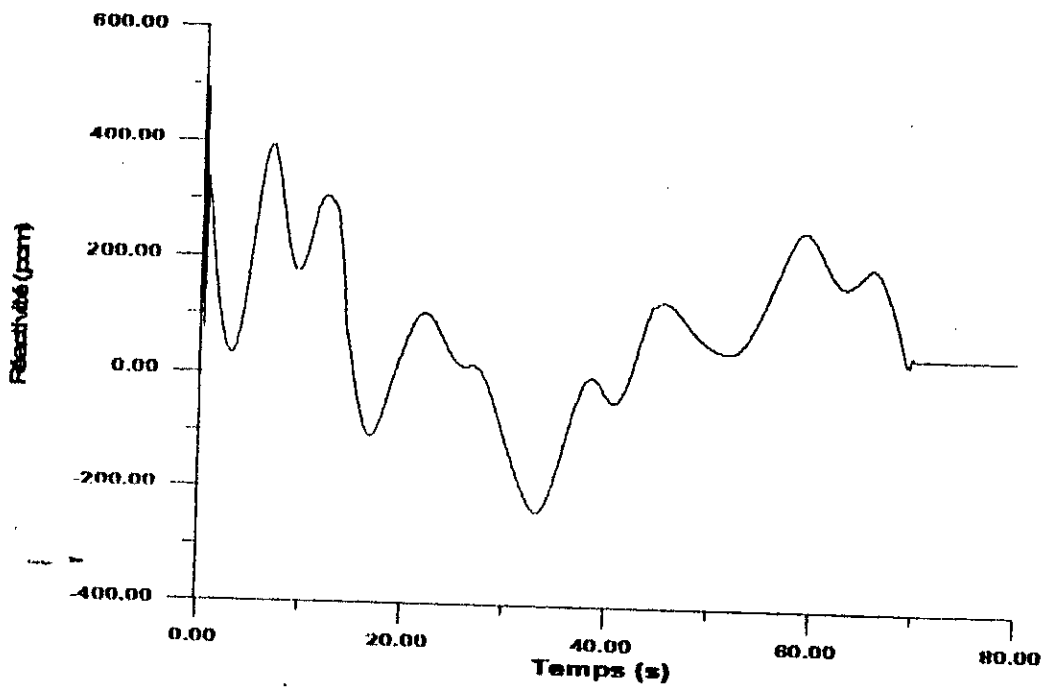


Fig.(IV.14.b): Evolution de la commande

L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (IV.13.c). Contrairement à ce qui précède, l'erreur est cette fois-ci plus importante.

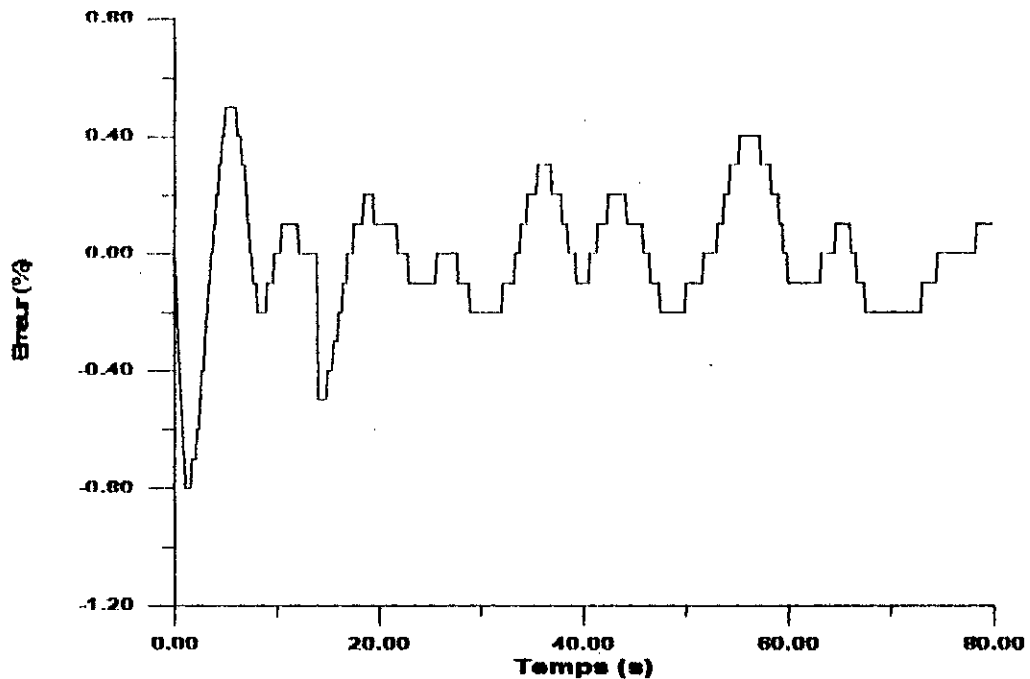


Fig.(IV.14.c): Evolution de l'erreur

Les résultats obtenus pour la valeur de  $\lambda = 4.E-7$ , sont plus performants.

Les résultats de simulation pour cette valeur de  $\lambda$ , en gardant les mêmes valeurs de  $h_i$ ,  $h_p$  et  $h_c$  sont indiqués sur les (figures (IV.15.a et b)). Donc  $\lambda$  doit être choisi judicieusement en fonction du gain du système.

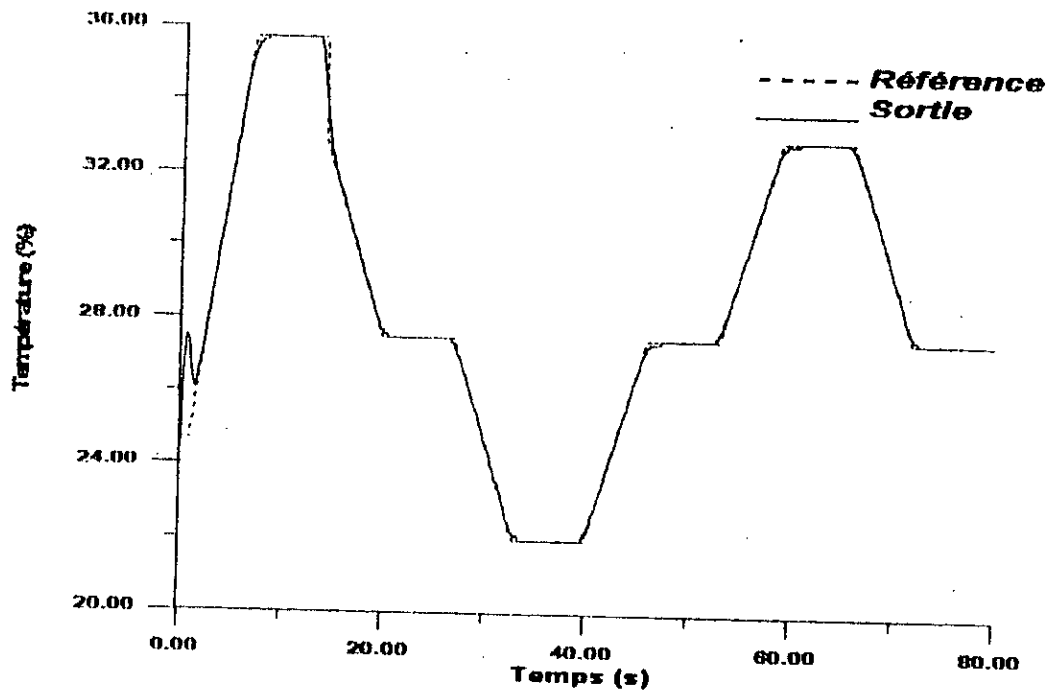


Fig.(VI.15.a): Evolution de la Température du modérateur

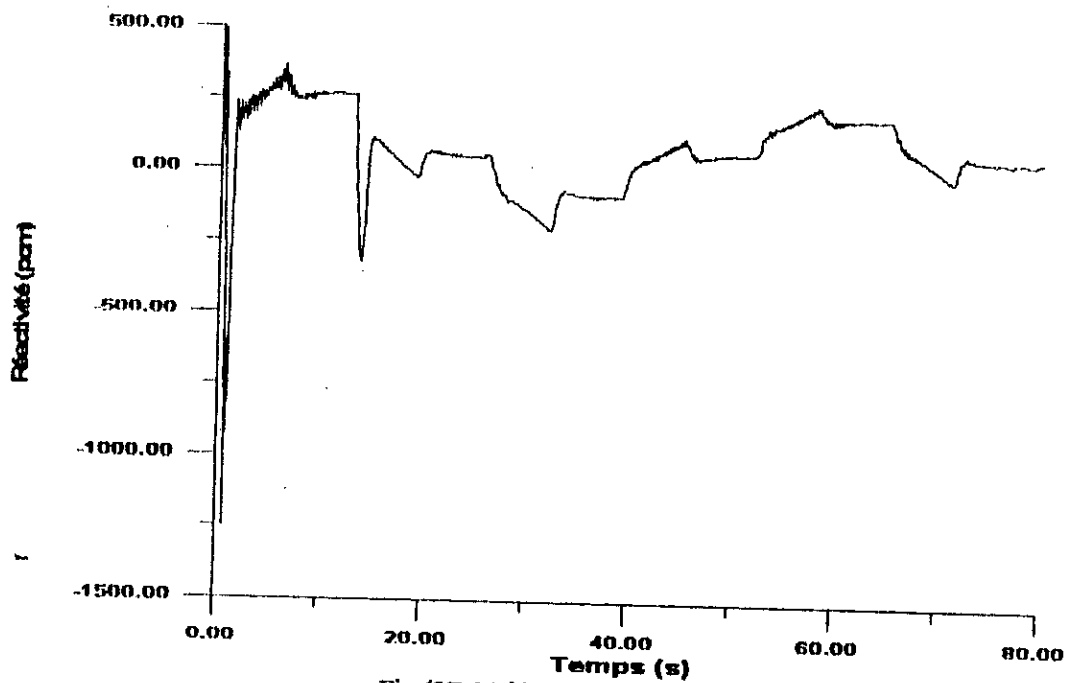


Fig.(VI.15.b): Evolution de la commande



L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (15.c). Cette erreur est jugée acceptable malgré qu'elle présente une amplitude d'environ  $0.4^{\circ}\text{C}$  durant le régime d'adaptation.

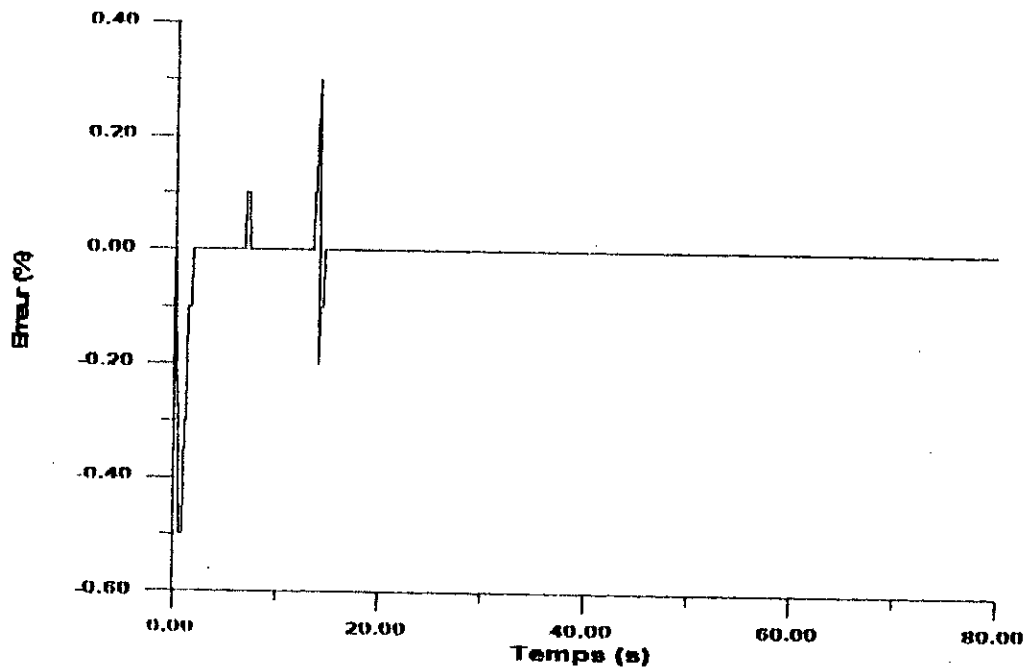


Fig.(IV.15.c): Evolution de l'erreur

#### 1) Cas avec perturbation:

Pour simuler le comportement du système en boucle fermée, en présence de perturbations, une séquence de bruit aléatoire est appliquée au système.

Les résultats de simulation pour  $h_p = 8$ ,  $h_i = 1$ ,  $h_c = 1$  et  $\lambda = 3.E-6$  sont représentés sur les figures (IV.16.a et b).

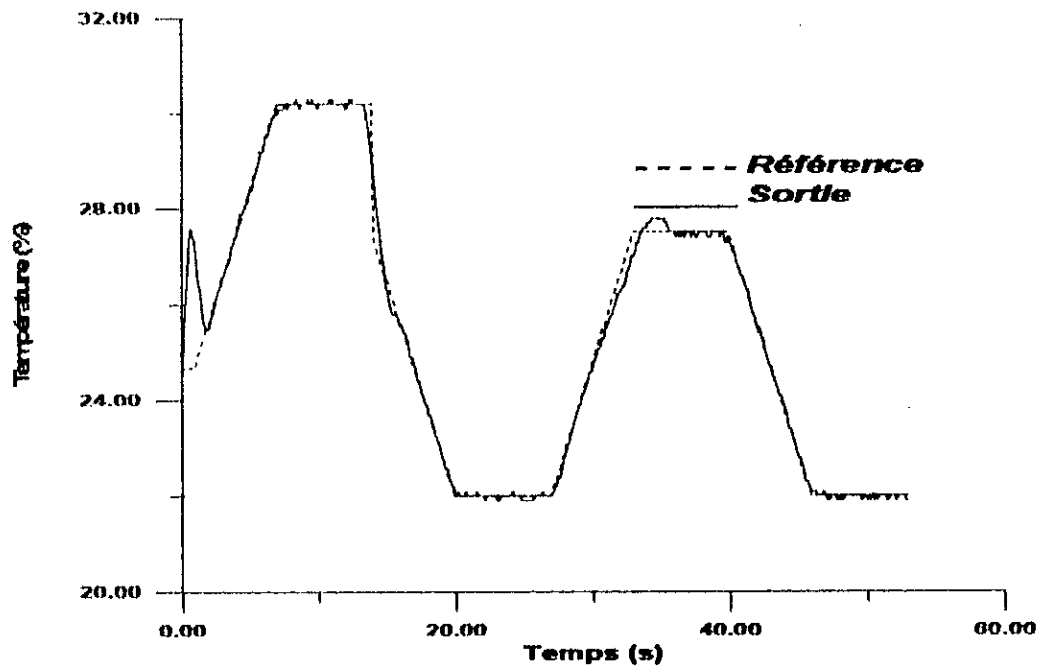


Fig.(VI.16.a): Evolution de la Température du modérateur

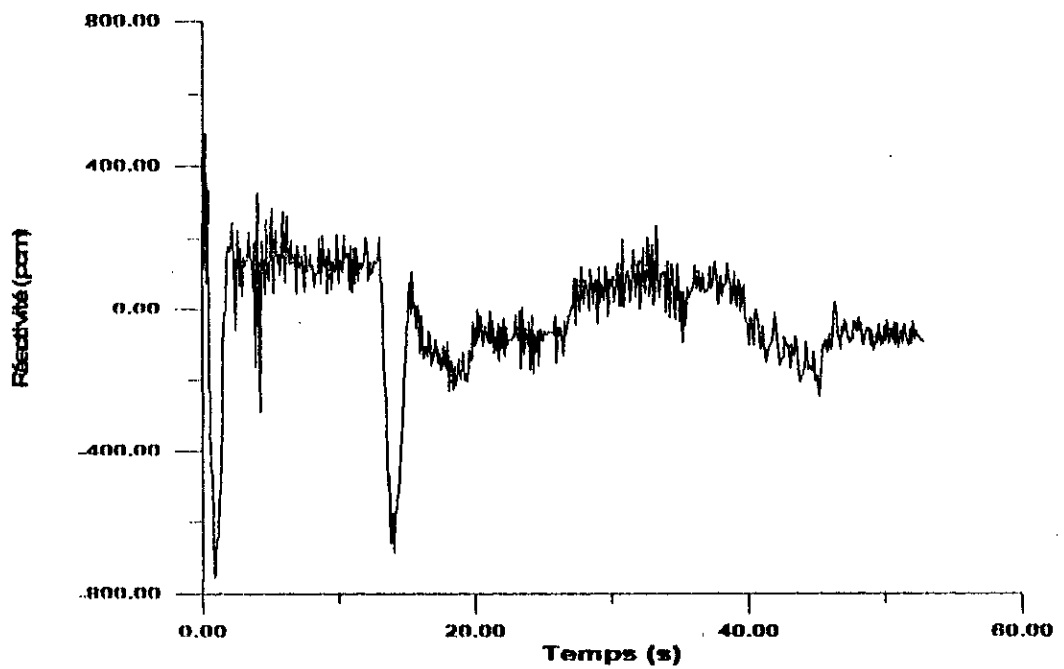


Fig.(VI.16.b): Evolution de la commande

L'évolution de l'erreur de suivi est indiquée sur la figure (IV.16.c). On constate que la régulation est parfaite alors que l'erreur de poursuite présente des amplitudes mais qui restent acceptables.

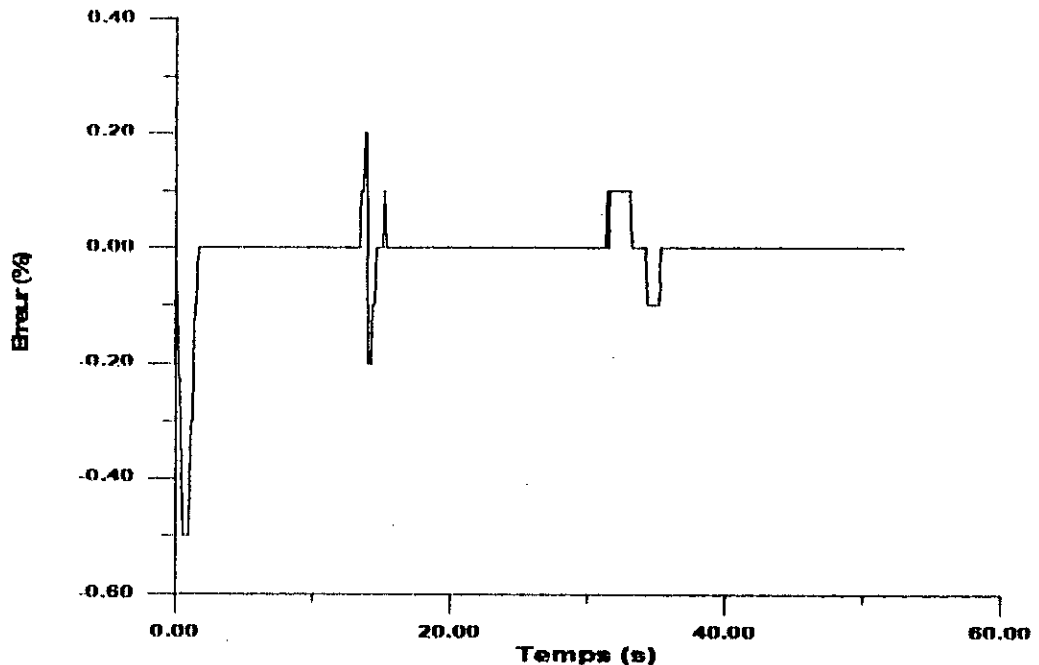


Fig.(IV.16.c): Evolution de l'erreur

Pour le GPC lorsqu'on applique une séquence de bruit aléatoire, on remarque un dépassement sur le premier palier, ensuite une convergence rapide vers la consigne avec une bonne régulation et poursuite. La commande se manifeste par des oscillations mais moins néfastes que dans le cas du PID. Ce qui montre bien l'utilité de recourir à la commande adaptative du moins pour le contrôle des réacteurs nucléaires.

Les figures (IV.16.d à f) indiquent respectivement l'évolution des paramètres  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$ . L'évolution des paramètres  $b_0$ ,  $b_1$  et  $b_2$  est montrée sur les figures (IV.16.g à i). Ces paramètres ne varient pas d'une manière considérable avec les changements de consigne, de même l'effet des perturbations est non plus considérable ce qui prouve la aussi la robustesse de l'algorithme à trace constante utilisé.

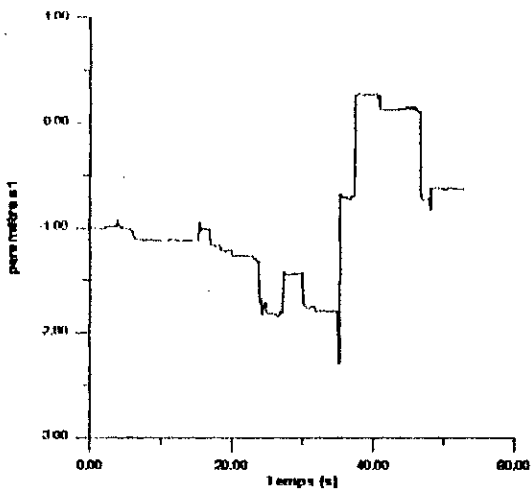


Fig.(IV.16.d): Evolution du paramètre a1

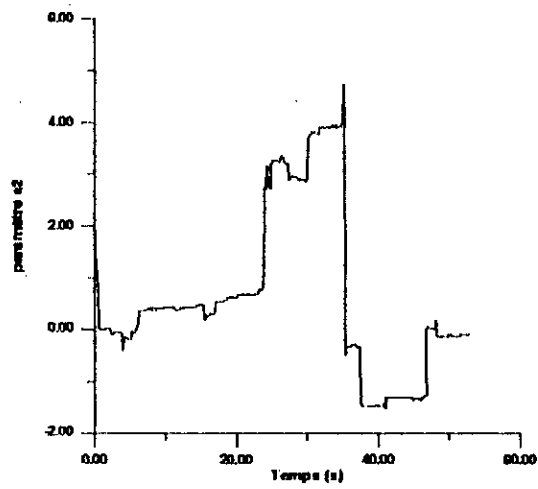


Fig.(IV.16.e): Evolution du paramètre a2

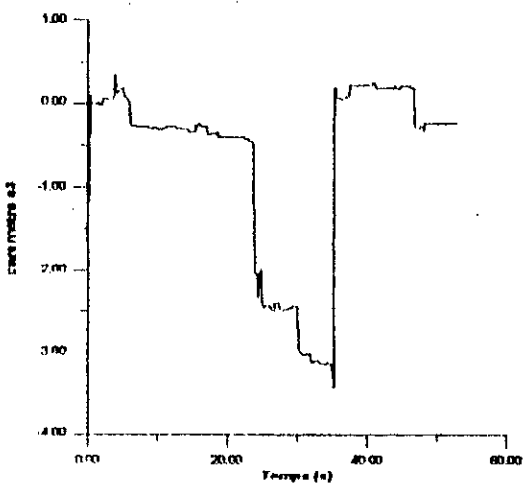


Fig.(IV.16.f): Evolution du paramètre a3

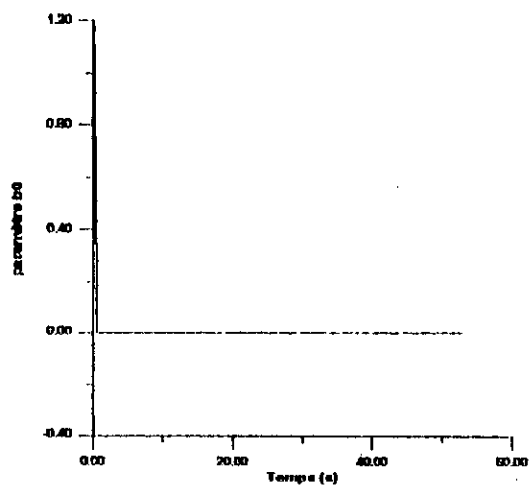


Fig.(IV.16.g): Evolution du paramètre b0

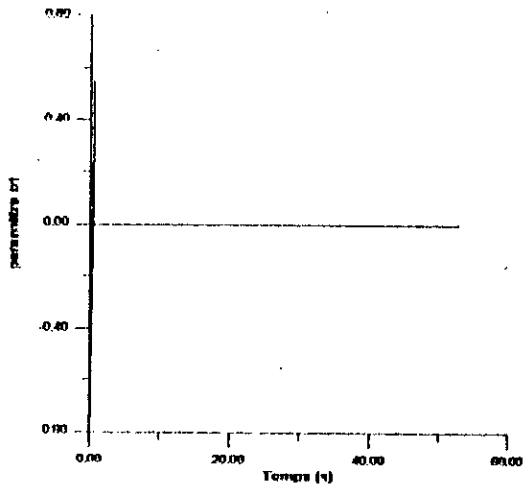


Fig.(IV.16.h): Evolution du paramètre b1

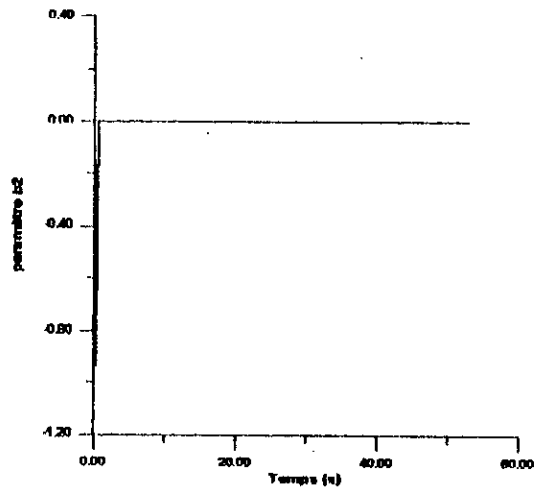


Fig.(IV.16.i): Evolution du paramètre b2

## CONCLUSION GENERALE

**D**urant ces dernières années, la commande adaptative et la commande prédictive en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherches.

La contribution apportée dans ce mémoire à la synthèse des systèmes de commande pour des centrales nucléaires type PWR, consiste en l'élaboration d'un schéma de commande adaptative (GPC) et à la mise en oeuvre sur un modèle non linéaire.

Afin de voir l'intérêt de la commande adaptative nous avons procédé à une étude comparative avec une commande conventionnelle type PID.

Les algorithmes proposés dans ce mémoire font appel à deux notions:

- l'identification paramétrique;
- la synthèse du régulateur.

Concernant le premier point, nous avons utilisé un algorithme récursif basé sur la méthode des moindres carrés récursifs à trace constante.

Le second point est basé sur la minimisation d'un critère quadratique et le réajustement automatique des paramètres du régulateur, qui sont directement liés aux résultats de l'estimation 'en ligne'.

Le schéma de commande adaptative prédictive (GPC) proposé dans ce mémoire est caractérisé par les aspects suivants:

- ☒ Un vaste domaine d'application: le procédé peut être instable ou à non minimum de phase avec le retard pur inconnu;
- ☒ Robustesse de la commande: la robustesse par rapport aux perturbations a été obtenue en utilisant un algorithme d'identification robuste.
- ☒ Possibilité de mise en oeuvre en temps réel: le choix judicieux de certains paramètres de synthèse tel que l'horizon de prédiction, permet de diminuer sensiblement la dimension du problème et le temps de calcul, ce qui donne la possibilité d'application de la méthode proposé sur des procédés réels.

L'intérêt de la commande prédictive généralisée apparaît l'ors de son application sur un modèle non linéaire d'une centrale nucléaire type PWR, avec d'importantes variations de la consigne.

Contrairement à la commande par régulateur PID, le GPC assure une bonne poursuite et régulation dans le cas avec ou sans perturbations.

Nous avons pu remarquer lors de la synthèse du GPC que les paramètres  $h_i$ ,  $h_c$ ,  $h_p$  et  $\lambda$  ont une grande influence sur les performances du système en boucle fermée, en effet le paramètre  $h_i$  doit être choisit supérieur au retard pour éviter des calculs inutiles. Par contre une grande valeur de  $h_i$  conduit à une erreur initiale plus importante.

L'horizon de prédiction  $h_p$  doit être choisit de façon à ce qu'il correspond au temps de réponse du système, une de valeur de  $h_p$  assez petite ne fournira pas un réglage stable.

On a pu remarquer aussi que la valeur de  $h_c$  égale à 1 est adéquate pour notre système, une plus grande augmentation introduit une énorme complexité de calcul d'où un temps de calcul très important. Aussi le coefficient  $\lambda$  ne peut être lié qu'au gain du système à régler, une grande augmentation de la valeur de  $\lambda$  peut provoquer l'instabilité du réglage.

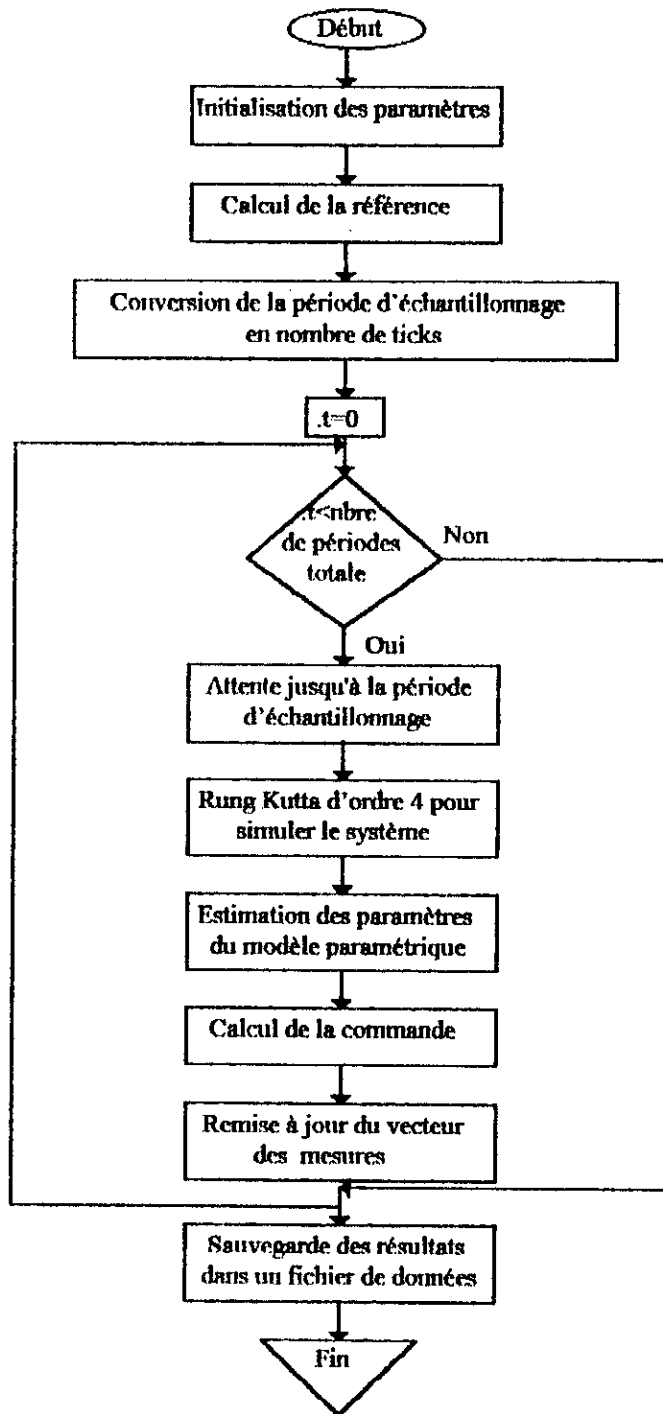
Enfin comme perspectives, nous pensons utile l'utilisation d'autres lois de commande telle que le MREP (Modèle de Référence sur l'Etat Partiel), qui a l'avantage de séparer la dynamique de régulation de la dynamique de poursuite, avec d'autre algorithmes d'adaptation paramétrique afin d'avoir un grand choix d'algorithmes qui peuvent être utilisés par la suite dans des applications industrielles réelles.

**ADVENTURES**



## Annexe I

### Organigramme général des algorithmes de commande en temps réel



## Annexe II

Tableau des paramètres du réacteur.[3 ]

Symbole	Définition	Valeur	Unité
$P_0$	Puissance nucléaire nominale à 100 %	2700	Mw
$\beta$	Fraction totale des neutrons retardés	640	pcm
$\theta$	Durée de vie moyenne d'un neutron	4.105	sec
$\lambda_1$	Probabilité de désintégration des noyaux précurseurs (1)	0,087	sec-1
$\lambda_2$	Probabilité de désintégration des noyaux précurseurs (2)	0,71	sec-1
$\alpha_u$	Coefficient DOPPLER	3	pcm/°C
$\alpha_m$	Coefficient modérateur	30	pcm/°C
$\beta_1$	Fraction des neutrons retardés du groupe (1)	286	pcm
$\beta_2$	Fraction des neutrons retardés du groupe (2)	354	pcm
K	Coefficient d'échange (Watt-Calorie)	0,24	Mw/°C
$M_u$	Masse du combustible	82,93	Tonnes
$C_u$	chaleur massique du combustible	77,1	Cal/°C.sec
$M_m$	Masse du modérateur	10,59 E 3	Kg
$C_m$	Chaleur massique du modérateur	1	Cal/°C.sec
$R_{um}$	Résistance thermique uranium-modérateur	2,46 E-3	m <sup>2</sup> C.sec/Cal
$R_{gm}$	Résistance thermique gaine-modérateur	1,83 E-3	m <sup>2</sup> C.sec/Cal
$R_{ug}$	Résistance thermique uranium-gaine	6,2 E-4	m <sup>2</sup> C.sec/Cal
$Q_m$	Débit d'eau dans le coeur	61.7 E 3	Kg/sec
$\rho_0$	Réactivité d'équilibre	0	pcm
$T_e$	Température de l'eau primaire à l'entrée du coeur	284	°C
$T_s$	Température de l'eau primaire à la sortie du coeur	302,8	°C

# REFERENCES

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] M.G.Park and N.Z.Cho 'Design of nonlinear model-based with adaptive PI of a nuclear reactor', *Progress in nuclear energy*, Vol. 27, N<sup>o</sup> 1 1992.
- [2] M.G.Park and G.H.Milley 'Application of adaptive control to a nuclear power plant', *Nuclear Science and Engenering* (1986).
- [3] A.Larabi et M.El moallem 'Simulation d'un reacteur nucleaire PWR 900 MW', *Thèse d'ingéniorat en électronique*, ENP, Juin 1982.
- [4] S.Mansouri, 'Simulation et Commande Multivariable d'un PWR 925', *Thèse de Magister en Génie nucléaire, Centre des études nucléaires et solaires*, Juin 1985.
- [5] I.D. Landau, 'Identification et Commande des Systèmes', *Edition Hermès, Paris*, 1993, 2<sup>ème</sup> Edition.
- [6] Guy Bornard, 'Commande Adaptative des Systèmes : Théorie, Méthodologie, Application', *LAAS, TOULOUSE*, Septembre 1990.
- [7] M.Allaoui, 'Etude de différents algorithmes de commande adaptative', *thèse d'ingéniorat en Automatique*, ENP, Septembre 1995.
- [8] T.Soder Strom & P.STOICA 'System Identification' *Edition Prentice hall International*.
- [9] Patrick Boucher & Martin Sigers 'Nouvelle Methode de determination des carrecteurs PID' *Le nouvelle Automatisme* 1981.
- [10] K.J.Astrom & B.Wittenmark 'Adaptative Control' *Edition Wersley Publishing company* 1989.
- [11] V.V. Chalam 'Adaptative Control System' *Marcel Dekker, Inc*, 1987.

- [12] K.Djebara 'Commande Predictive généralisée' *Rapport de stage au LAAS du CNRS*, aout 1991.
- [13] Ould-arbi .F 'Commande Predictive Adaptative d'un moteur a courant continue' *P.F.E*, I.N.H,1993.
- [14] D.W.Clarke , C.Mohtadi & P.Stuffs 'Generalized Predictive Control' *Automatica*, Vol. 23, No.2, part. I, pp. 137-148, 1987.
- [15] D.W.Clarke , C.Mohtadi & P.Stuffs 'Generalized Predictive Control' *Automatica*, Vol. 23, No.2, part. II, pp. 149-160, 1987
- [16] C.Faulard & S.Gentil 'Commande et Régulation par Calculateur Numérique' *Edition Eyrolles*, 1984.
- [17] D.W.Clarke & C.Mohtadi 'Properties of Generalized Predictive Control' *Automatica*, Vol.25, No.6, 1989.
- [18] N.Bali 'Etude des performance de la commande prédictive généralisée' *Thèse de magister*, E.N.P.Alger, 1995.
- [19] I.D.Landau & L.Dugard 'Commande Adaptative aspects pratique et théorique' *Edition Masson*, 1986.
- [20] D.W.Clarke, B.A.Phil & P.J.Gawthrop 'Self-Tuning Control' *Proc.IEEE*, Vol.126, No.6, June 1979.
- [21] G.Favier 'Self-Tuning Large-Range Predictive Controllers' *Automatica, Control World Congress*, Vol.10, pp83-90, 1987.
- [22] K.W.Lim & K.V.Ling 'Generalized Predictive Control of a heat exchanger' *IEEE Cont. Syst.Magazine*.
- [23] B.Frogner & H.S.Rao 'Control of Nuclear Power Plants' *IEEE Trans. On Autom. Control*, Vol. Ac-23, No.3, June 1978