

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

16/94

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT *Génie Electrique*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Decouplage et commande
non-lineaire d'une
centrale solaire.*

Proposé par :

M^r S.A. DERRADJI
M^r F. BOUDJEMA

Etudié par :

M^r KADI Kamel
M^r LOUNI Youcef

Dirigé par

M^r S.A. DERRADJI
M^r F. BOUDJEMA

PROMOTION

Juin 1994

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Genie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Decouplage et commande
non-lineaire d'une
central solaire*

Proposé par :

M^r S.A. DERRADJI

M^r F. BOUDJEMA

Etudié par :

M^r KADI Kamel

M^r LOUNI Youcef

Dirigé par

M^r S.A. DERRADJI

M^r F. BOUDJEMA

PROMOTION

Juin 1994

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude pour nos promoteurs, Monsieur S.A.DERRADJI et Monsieur F. BOUDJEMA pour leurs orientations et leur suivi permanent.

Nous remercions vivement toutes les personnes avec lesquelles, il a été établi des contacts fructueux, ou qui nous ont aidé indirectement: Mr Tedjiza du C.D.E.R, Mr Bounor de l'E.N.P, le sympathique personnel de la bibliothèque et du périodique, aussi notre ami Ahmed Arab qui a mis à notre disposition le matériel informatique, et Monsieur le responsable de l'IFSI d'avoir autorisé l'utilisation de ce même matériel.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes *chers parents*, qui ont tout fait pour ma réussite;

A la mémoire de ma soeur aînée *Dalila*, que Dieu lui
accorde sa miséricorde;

A mes frères et soeurs (*Aïcha, Djilali, Hocine et fatima*)
les bien aimés;

A tous les membres de l'association de bienfaisance
"OMAR IBN ABD EL AZIZ";

Aux proches et voisins, ainsi qu'à tous mes amis.

Youcef.

A tous ceux et à toutes celles, dont l'existence donne un
sens à ma vie :

A toi merveilleuse et affectueuse mère

A toi chère père.

A toi *Grand* frère *Arezki* en guise de reconnaissance à ton
amour, et à tes sacrifices pour nous.

A vous mes frères,

A vous mes sympathiques soeurs, ainsi qu'à vos époux.

A ma Linda

A tous mes cousins, en particulier " Djouzi " et " Moudoud "

A mes amis,

je dédie ce *très modeste* travail.

Pour mon binôme *Youcef* et sa famille, tous mes voeux de bonheur.

Kamel.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	2
Chapitre I	
Déscription de la centrale solaire.....	3
I.1 Introduction.....	5
I.2 Domaine de puissance et mode d'utilisation.....	5
I.3 Les centrales thermodynamiques.....	5
I.4 Description de la centrale étudiée.....	5
I.4.1 Le champ d'héliostats.....	5
I.4.2 Les différentes boucles de la centrale.....	8
I.5 Le stockage et le phénomène de stratification.....	9
I.6 Conclusion.....	13
Chapitre II	
Modélisation.....	14
II.1 Introduction.....	15
II.2 Modèle du générateur de vapeur.....	16
II.2.1 Représentation schématique de l'échangeur.....	16
II.2.2 Hypothèses préliminaires.....	16
II.2.3 Formulation du modèle.....	17
II.3 Modèle de la turbine à vapeur.....	20
II.4 Représentation d'état du système globale.....	22
II.4 Simulation du système en boucle ouvert.....	25
II.6 Conclusion.....	26

Chapitre III

Théorie du bouclage non linéaire.....	29
III.1 Système Mono-entrée/Mono-sortie.....	30
III.1.1 Introduction.....	30
III.1.2 Transformation locale de coordonnées.....	31
III.1.3 Notion de degré relatif.....	31
III.1.4 Forme normale.....	33
III.1.5 Linéarisation exacte par bouclage.....	34
III.1.6 Dynamique des zéros.....	37
III.2 Système Multi-entrées/Multi-sorties.....	40
III.2.1 Introduction.....	40
III.2.2 Notion du degré relatif vectoriel.....	41
III.2.3 Forme normale.....	41
III.2.4 Dynamique des zéros.....	43
III.2.5 Linéarisation exacte par bouclage.....	44
III.2.6 Commande non-interactive.....	47
III.2.7 Notion sur le bouclage statique et dynamique... ..	49
III.3 Conclusion.....	52

Chapitre IV

Synthèse de la commande linéaire.....	53
IV.1 Introduction.....	54
IV.2 Synthèse de la commande linéarisante.....	54
IV.2.1 Bouclage statique.....	55
IV.2.2 Bouclage dynamique.....	55
IV.3 Conclusion.....	62

Chapitre V

Commande du système.....	63
V.1 Introduction.....	65
V.2 Réglage par retour d'état.....	65
V.2.1 Structure de la commande.....	65
V.2.2 Résultats de la simulation et commentaires.....	67
V.3 Réglage classique.....	67
V.3.1 Structure de la commande.....	67
V.3.2 Résultats de la simulation et commentaire.....	68
V.4 Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	77

Annéxes

Bibliographie

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le travail que nous présentons dans ce mémoire, est une contribution d'une part, à l'élargissement du champs d'application de la commande linéarisante à des systèmes non électrique; et d'autre part, à la commande d'une centrale solaire à tour, en vue de fournir une fréquence de réseau constante. Nous avons donc, abordé notre étude en trois étapes:

- Modélisation.
- Linéarisation par bouclage non-linéaire.
- commande.

Deux aspects originaux, se dégagent de ce travail:

Le premier consiste en l'idée de base de la commande de température de sortie de l'échangeur thermique, en vue de maintenir constante, la pression en amont de la turbine. Pour cela nous avons pensé exploiter le phénomène de stratification des températures dans le réservoir de stockage chaud, pour puiser de l'énergie thermique à un niveau où à un autre de ce dernier. Cela se fera à l'aide d'un mécanisme (organe de commande) qui reste à concevoir et dont on ne tiendra pas compte dans la modélisation.

L'autre aspect réside dans l'application de la commande linéarisante, à un système multi-entrées/multi-sorties (bicarré), et hybride (thermique, mécanique).

Le rapport de ce mémoire est partagé en cinq chapitres. Le chapitre I présente la centrale électro-solaire qui fait

l'objet de notre étude. Les caractéristiques de celle-ci sont celles d'un projet Français "centrale THEMIS" extrapolée à une puissance maximale de 10 MW [15]. Dans le chapitre II, nous développerons les équations mathématiques du modèle non-linéaire (bilinéaire) de notre système, que nous avons nous même élaboré, en nous basant sur les lois de transfert thermique, et moyennant quelques hypothèses simplificatrices.

Au chapitre III, nous exposerons l'essentiel de la théorie du bouclage non linéaire (commande linéarisante) sous l'aspect géométrie différentielle, dans le cas des systèmes monovariabiles et multivariabiles. Nous vérifierons au chapitre IV, à l'aide de simulation les résultats obtenus sur le système auquel nous avons synthétisé la commande linéarisante. Dans le dernier chapitre (chap.V), on commandera le système linéarisé et découplé par les techniques de commande des systèmes linéaires, et on interprètera les résultats obtenus de la simulation. Le mémoire prendra fin par une conclusion générale et des annexes.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DE LA CENTRALE SOLAIRE

Chapitre I

DESCRIPTION DE LA CENTRALE SOLAIRE ETUDIEE

I) Introduction:

Les recherches sur le développement de ressources énergétiques nouvelles, notamment renouvelables, sont de plus en plus une nécessité compte tenu des problèmes de disponibilité des sources fossiles d'énergies, et des problèmes d'environnement de plus en plus importants. Plusieurs pays manifestent un intérêt envers le développement de filières énergétiques nouvelles, notamment les filières de conversion de l'énergie solaire.

Parmi les différentes énergies utilisées que devra offrir le soleil, figure l'électricité dont la demande évolue étroitement avec le niveau de développement.

II. Domaine de puissance et mode d'utilisation [12]:

La gamme "petites puissances" (10 à 100 kW) est celle d'unités produisant de l'énergie à une fin spécifiques : pompages, alimentation d'un relais hertzien, d'un habitat isolé, etc.. Les systèmes photovoltaïques apparaissent les plus performants et les mieux adaptés à de telles utilisations.

La gamme "moyenne puissance" (100 kW à 1 MW) est généralement destinée à alimenter des sites isolés de petits réseaux de distribution.

Le domaine des centrales de "forte puissance" qui s'étend de 1 à 100 MW est jusqu'à présent celui des centrales thermodynamiques à tour. Ces unités sont destinées à débiter sur de vastes réseaux de distribution électrique.

III. Les centrales thermodynamiques:

Les centrales thermodynamiques sont caractérisées par chaque état de leur chaîne de conversion électro-solaire, soit:

- leur mode de conversion héliothermique
- leur fluide caloporteur
- leur stockage
- leur cycle de conversion thermodynamique,

forment un ensemble extrêmement diversifié.

Parmi les systèmes de conversion thermodynamique il y a:

- convertisseur central à focalisation centrale
 - convertisseur central à focalisation linéaire
 - convertisseur distribué à concentration sphérique
 - convertisseur à focalisation ponctuelle
- etc...

chaque mode de conversion héliothermique forme une filière thermodynamique. A l'intérieur de chacune d'elles différents modes de collecte, de stockage, de conversion thermodynamique peuvent être réunis.

IV. Description de la centrale étudiée [15]:

La centrale solaire étudiée Fig(1.1) est une centrale solaire héliothermodynamique à collecteur central à concentration ponctuelle. Il s'agit donc d'une centrale à tour, destinée à fournir 8 MW en puissance nominale et se situe donc dans la gamme "forte puissance".

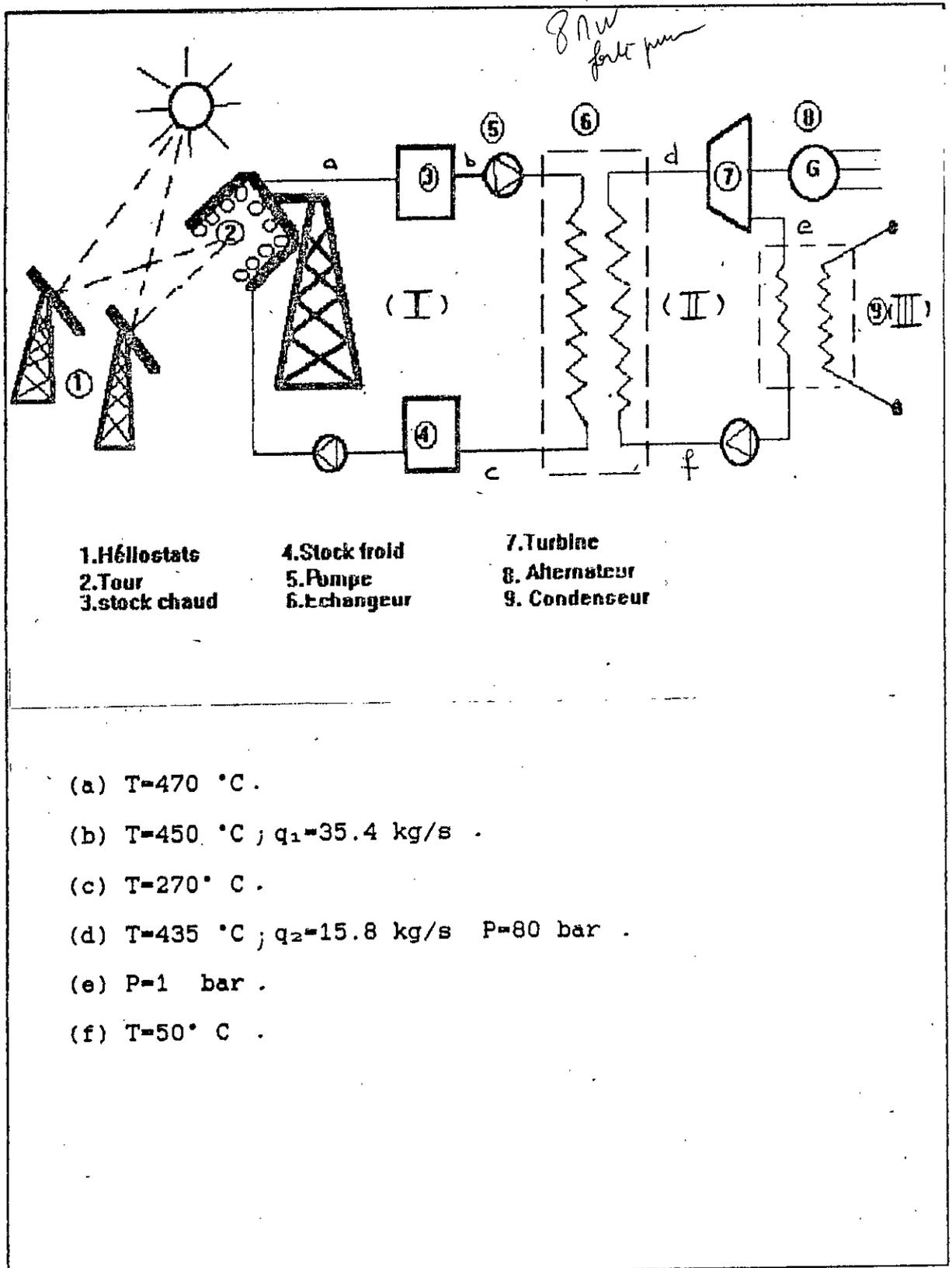


fig:(1.1) schéma de principe d'une centrale thermodynamique à tour

Nous présentons ci-après succinctement l'installation, les caractéristiques de la centrale sont données à la fin de ce chapitre. Les composants intervenant dans nos modélisations sont présentés de façon plus approfondies au cours de l'exposé de ceux-ci.

IV.1) Le champ d'héliostats:

Il est composé de 1600 héliostats focalisants de 54 m² chacun, et a pour rôle, sous la conduite d'un système central de commande et de contrôle, d'assurer la focalisation du rayonnement solaire direct vers l'ouverture de la chaudière solaire.

IV.2) Les différentes boucles de la centrale:

Elle est composée de trois boucles principales, à savoir:

a) la boucle de chauffe (boucle I):

Il y circule un fluide monophasique. Ce fluide est un sel fondu appelé aussi le Hitec (mélange de nitrates et nitrites de sodium et de potassium). Ce choix est pleinement justifié par sa stabilité et son effet non corrosif jusqu'à 500°C et par ses bonnes qualités de transfert thermique. Ce sel doit être maintenu au dessus de 170 °C pour rester liquide.

A l'état dit "froid" (200/250 °C) ce sel est stocké dans un réservoir à partir duquel une pompe à vitesse variable l'envoie dans la chaudière solaire. Il se produit dans cette dernière trois types de transferts thermiques: conduction, rayonnement, et convection. Le fluide caloporteur en sort avec un potentiel énergétique plus grand (augmentation d'enthalpie). Il passera ensuite dans le primaire d'un générateur de vapeur pour transférer son énergie thermique au secondaire de celui-ci.

b) La boucle de travail (boucle II):

Le fluide qui y circule (eau) passe dans le secondaire du générateur de vapeur et par transfert de chaleur récupère une certaine quantité d'énergie transférée du primaire. L'eau à l'état liquide voit son potentiel énergétique augmenter et passe de ce fait à l'état vapeur surchauffée. Cette vapeur alimente un groupe turbo alternateur. La détente s'effectue selon un cycle thermodynamique jusqu'à une valeur d'environ 1 bar qui est la pression moyenne dans le condenseur.

c) La boucle de refroidissement (boucle III):

Elle est constituée principalement d'un condenseur dimensionné de telle sorte qu'il assure la condensation à 1 bar environ, avec une eau de refroidissement de 20 °C

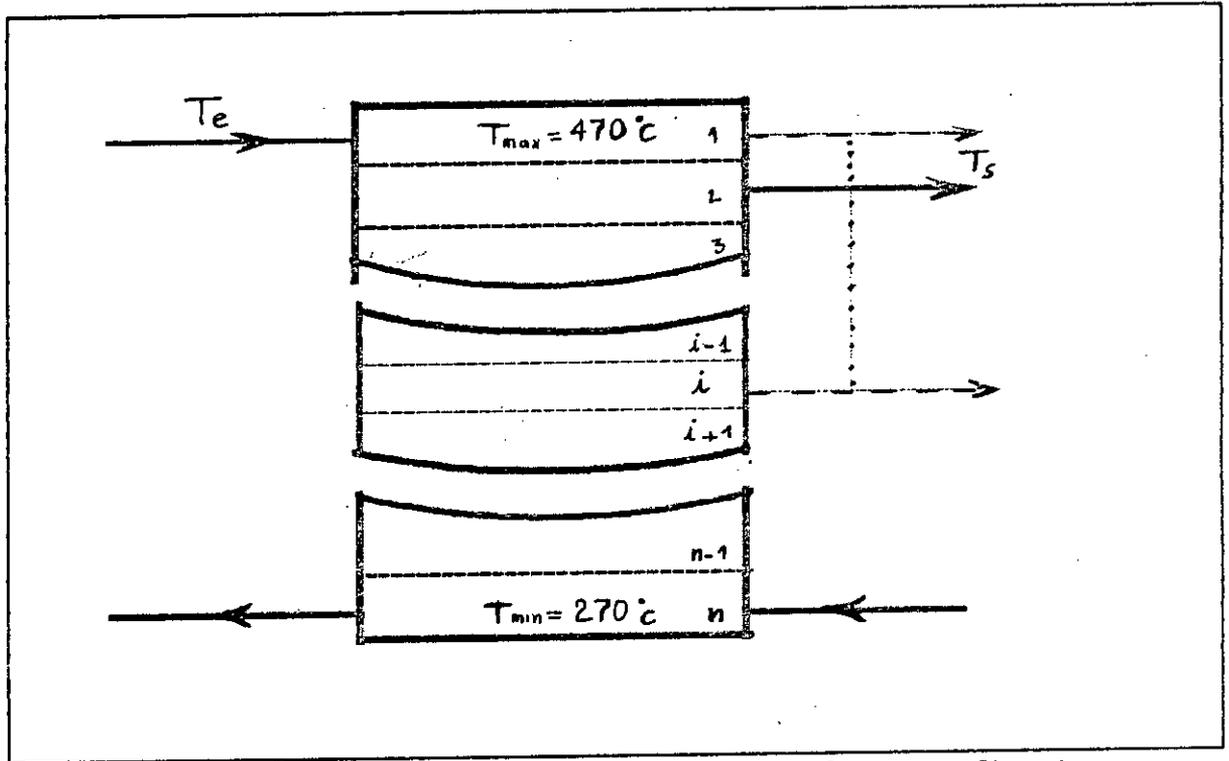
V) Le stockage et le phénomène de stratification:

Comme dans tous les systèmes à énergie solaire, on s'intéresse au problème de stockage thermique, de façon à protéger les matériels utilisateurs, la turbine en particulier, des variations brutales et incontrôlables de la puissance incidente au passage des nuages et aussi à assurer la continuité de la fourniture d'énergie ou son report à l'échelle de la journée, sans subir des coûts excessifs ou des pertes de rendement insupportables.

Les dimensions considérables du réservoir de stockage de chaleur font que les températures à l'intérieur de ce dernier sont stratifiées Fig(1.2).

C'est à dire que la température du sel fondu est variable en fonction de la hauteur du réservoir. En effet, on retrouve la plus haute température (470°C) au sommet du réservoir et la plus basse (270°C) au bas de ce dernier. Nous avons justement pensé puiser de l'énergie thermique à un niveau où à

un autre du réservoir de stockage chaud, afin de maintenir constante (435°C) la température de la vapeur en amont de la turbine, grâce à une régulation qu'on établira plus loin.



Fig(1.2) le stockage chaud et le phénomène de stratification

PERFORMANCES EN REGIME NOMINALE

Puissance incidente sur le champ : 35 860 kW
Puissance réfléchie: 29 209 kW
Pertes chaudière :
 - réflexion: 166 kW
 - rayonnement: 617 kW
 - convection: 710 kW
Puissance captée par la chaudière: 27 716 kW
Puissance électrique brute: 9 376 kW
Auxilliaires:
pompe à sel fondu : 337 kW
pompe à eau: 169 kW
héliostats et divers : 100 kW
puissance électrique nette : 8770 kW
(rendement global : 31 %)

CARACTERISTIQUES DU RECEPTEUR SOLAIRE:

Surface développée de la cavité:..... 399 m²
Surface optimale d'ouverture : 50.3 m²
Surface d'échange: 324 m²
Coefficient d'absorbtion apparent : 0.994
Coefficient d'émission apparent: 0.974
Température équivalente moyenne : 419 °C
Caractéristique des tubes:
 Diamètre extérieur : 18 mm
 Epaisseur : 1.5 mm
 Longueur totale : 11 500 m

Vitesse maximum de circulation du hitec: 2.8 m/s

Pertes de charge au régime nominal: 7.2 bar

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU

CIRCUIT PRIMAIRE :

Reservoirs à Hitec (2 reservoirs identiques)

Volume : 110 m³

Longueur : 11 m

Diamètre : 3.6 m

Fluide de stockage :

Quantité de fluide nécessaire au stockage de chaleur: 167 T

Températures de stockage : 274/470 °C

Pompe principale (pompe d'alimentation):

-Type : à axe vertical immergée dans le stock froid

-Débit global d'alimentation : 123.4 kg/s

-Pression de refoulement : 30.5 bar

-Consommation : 340 kW

Pompe de stock chaud :

-Débit maximal : 46.3 kg/s

-Pression de refoulement : 2 b

-Consommation : 10 kW

VI) Conclusion:

Nous venons de présenter dans ce chapitre, une description générale, d'un type de centrale solaire, à savoir "la centrale solaire à tour" en vue de réguler la vitesse de rotation de la turbine, donc la fréquence du réseau au voisinage de sa valeur nominale, indépendamment de la variation de la charge. On présentera dans les deux prochains chapitres (II et III) les outils et les techniques de base qui nous conduiront aux objectifs fixés.

CHAPITRE II

- MODELISATION

MODELISATION

I) Introduction:

La modélisation d'un système thermique constitue une démarche classique très développée dans la littérature; néanmoins, celle-ci diffère notablement suivant le but assigné à celle-ci [11]. En effet, deux grands axes peuvent être dégagés:

. d'une part, la modélisation d'un système en vue de son étude détaillée et d'une optimisation structurelle.

. d'autre part, la modélisation dans le but de commander un processus.

Nous avons adopté cette dernière approche qui consiste à l'élaboration d'un modèle mathématique rendant compte du comportement entrées/sorties du système physique. L'étude se pose alors sous la forme d'un dilemme précision-simplicité. Ceci est dû au fait que pour la commande le modèle doit être :

* le plus précis possible afin de permettre l'analyse du comportement statique et dynamique du processus par rapport aux entrées principales et aux perturbations.

** d'une simplicité suffisante pour autoriser la synthèse d'une méthode de commande matériellement réalisable.

Ainsi nous avons opté pour la modélisation en vue de la commande de la vitesse de rotation de la turbine.

II) Modèle du générateur de vapeur :

II.1) Représentation schématique de l'échangeur :

Cet échangeur fonctionne à contre-courant, c'est à dire que le fluide chaud f_1 circule en sens contraire du fluide f_2 [7].

On a : $T_2 \ll T_1$ et $T_3 \ll T_4$

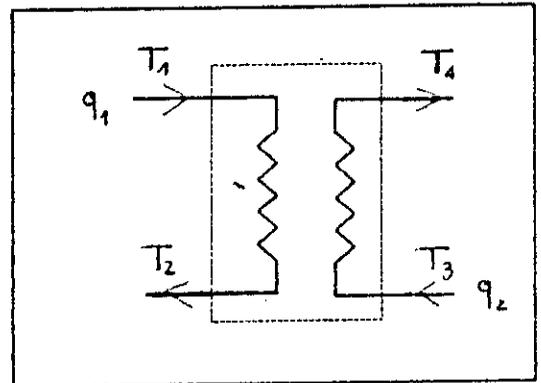
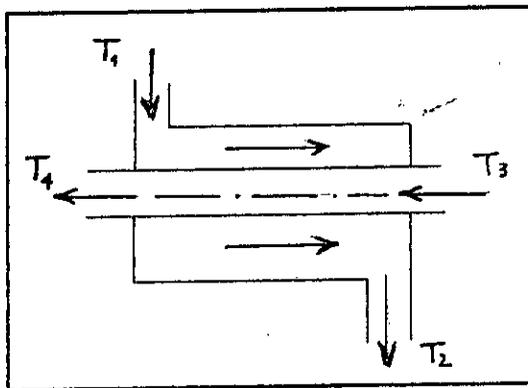


Fig (2.1): Représentations schématiques de l'échangeur.

II.2) Hypothèses préliminaires [7] [11]:

Les principales hypothèses retenues pour établir le modèle sont les suivantes:

1) Le fluide utilisé (Hitec), est incompressible et ses propriétés physiques ne varient pas dans la plage de fonctionnement. On considère donc les valeurs des coefficients de ce fluide constantes.

2) le mode de transfert thermique prépondérant entre le faisceau tubulaire et le fluide se fait par convection. Le régime d'écoulement dans le faisceau est du type turbulent.

3) la température du fluide caloporteur (T_{f1}) et du fluide de travail (T_{f2}) à l'intérieur de leurs tubes respectifs peuvent

s'exprimer en fonction des températures d'entrées et de sortie des fluide.

$$T_{f1} = \frac{T_1 + T_2}{2} ; \quad T_{f2} = \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (2.1)$$

II.3) Formulation du modèle :

Le schéma bloc de la figure (2.2) permet de visualiser l'entrée-sortie du système ainsi que la grandeur perturbatrice. Pour établir le modèle de ce système nous nous

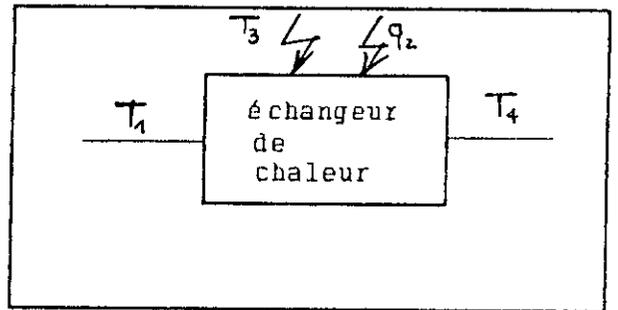


Fig (2.2): schéma bloc de l'échangeur

appuierons sur le principe des transferts thermiques, et afin d'obeir aux règles classiques d'automatique; toutes les formulations seront faites sous forme d'équations d'état.

Ecrivons pour les milieux considérés, le bilan énergétique mis en jeu. Cette démarche fait appel aux équations élémentaires régissant les transferts thermiques [7] [8].

- Energie thermique apportée par le fluide caloporteur f1 :

$$W_{f1} = C_{f1} Q_1 (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

- Energie échangée entre le fluide f1 et le faisceau tubulaire:

$$W_{f1H} = S (T_{f1} - T_{f2}) h_{f1H} \quad (2.3)$$

- Energie échangée entre le faisceau M et le fluide f2 :

$$W_{Mf2} = D_{Mf2} S (T_M - T_{f2}) \quad (2.4)$$

-Energie disponible à l'entrée de la turbine :

$$W_{f2} = C_{f2} Q_2 (T_4 - T_3) \quad (2.5)$$

avec :

S : surface moyenne d'échange.

C_{p1}, C_{p2} : capacités calorifiques respectivement des fluides f1 et

f2 q_1, q_2 : débits massiques respectivement des fluides f1 et f2

Lors de ce calcul l'isolation de l'échangeur est supposée parfaite. A l'aide de de ces bilans d'énergies, écrivons les relations régissant le comportement dynamique des températures des fluides et du faisceau tubulaire.

- Echauffement du fluide caloporteur f1 :

$$m_{f1} C_{p1} \frac{dT_{f1}}{dt} = W_{f1} - W_{f1M} \quad (2.6)$$

or sachant (2.1) et T_1 constant:

$$\frac{dT_{f1}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dT_2}{dt}$$

alors (2.6) devient :

$$m_{f1} C_{p1} \frac{dT_2}{dt} - 2(W_{f1} - W_{f1H}) \quad (2.7)$$

où bien :

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} = & \frac{(2C_{f1}Q_1 - h_{f1H}S)}{m_{f1}C_{p1}} T_1 - \frac{(2C_{f1}Q_1 + h_{f1H}S)}{m_{f1}C_{p1}} T_2 \\ & + \frac{(2h_{f1H}S)}{m_{f1}C_{p1}} T_H \end{aligned} \quad (2.8)$$

- Echauffement du fluide de travail f2 :

$$m_{f2} C_{p2} \frac{dT_{f2}}{dt} - W_{Hf2} - W_{f2} \quad (2.9)$$

or sachant (2.1) et T_3 constant :

$$\frac{dT_{f2}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dT_4}{dt}$$

alors (2.8) devient :

$$m_{f2} C_{p2} \frac{dT_4}{dt} - 2(W_{Hf2} - W_{f2}) \quad (2.10)$$

ou bien:

$$\begin{aligned} \frac{dT_4}{dt} = & \frac{(2C_{f2}Q_2 - h_{Hf2}S)}{m_{f2}C_{p2}} T_3 - \frac{(h_{Hf2}S + 2C_{f2}Q_2)}{m_{f2}C_{p2}} T_4 \\ & + \frac{2h_{Hf2}S}{m_{f2}C_{p2}} T_H \end{aligned} \quad (2.11)$$

- Echauffement du faisceau tubulaire noté M :

$$m_H C_{pH} \frac{dT'_H}{dt} = W_{f1H} - W_{mf2} \quad (2.12)$$

ou bien :

$$\begin{aligned} \frac{dT'_H}{dt} = & \frac{h_{f1H} S}{2 m_H C_{pH}} T_1 + \frac{h_{f1H} S}{2 m_H C_{pH}} T_2 - \frac{(h_{f1H} + h_{mf2}) S}{2 m_H C_{pH}} T_H + \\ & + \frac{h_{mf2} S}{2 m_H C_{pH}} T_3 + \frac{h_{mf2} S}{2 m_H C_{pH}} T_4 \end{aligned} \quad (2.13)$$

III. Modélisation de la turbine à vapeur :

a) représentation schématique :

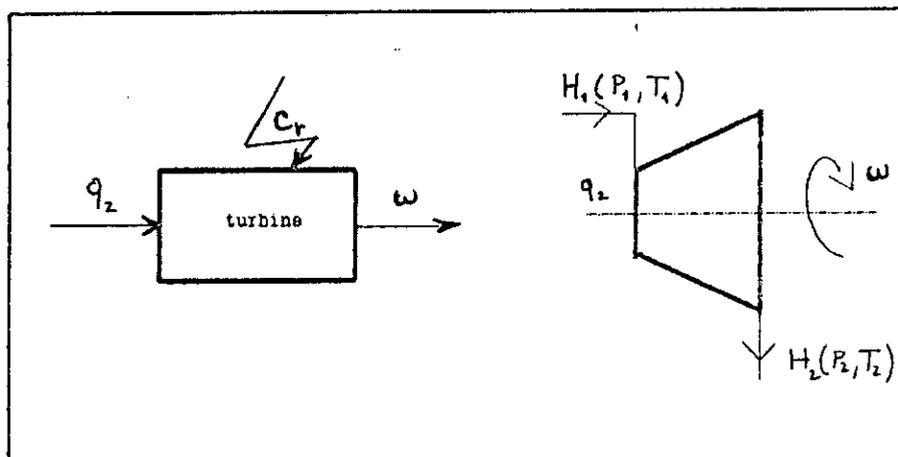


Fig (2.3): Schéma bloc de la turbine.

b) formulation du modèle:

La puissance électrique produite par le groupe turbo-alternateur est fonction du débit de vapeur admis dans la turbine. La modélisation du composant doit donc déboucher sur une relation liant la puissance électrique ou encore la vitesse de rotation de la turbine au débit de vapeur [6] [8].

L'équation différentielle régissant le mouvement de la turbine à vapeur est donné par la relation de l'énergie cinétique:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_m - \Gamma_r \quad (2.14)$$

où

J : moment d'inertie [kg.m^2]

ω : vitesse angulaire de la turbine [rd/s]

Γ_m : couple mécanique développé par la turbine et fonction du débit de vapeur [N.m]

Γ_r : couple résistant, image de la charge aux bornes du générateur [N.m]

on peut écrire d'autre part :

$$P_m = \Gamma_m \cdot \omega \quad (2.15)$$

ou bien :

$$P_m = q_2 \cdot \omega \cdot \Delta H \quad (2.16)$$

avec:

q_2 : débit de vapeur [kg/s]

P_m : puissance mécanique [W]

ω : vitesse angulaire [rd/s]

Pendant le fonctionnement établi et selon le régime du moment, la variation d'enthalpie ΔH reste pratiquement constante. Ainsi on pourra écrire que :

$$P_m - k q_2 \quad \text{ou} \quad k = \Delta H - P_m / q_2 \quad (2.17)$$

P_m : puissance mécanique nominale

q_2 : débit nominal de vapeur

en tenant compte de (2.15) et (2.16) alors (2.14) devient :

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \Gamma_r = \frac{k q_2}{\omega} - \Gamma_r$$

ou encore en posant : $\Gamma_r / J = C_r$

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{k}{\omega} \right) \frac{q_2}{\omega} - \frac{\Gamma_r}{J} \quad (2.18)$$

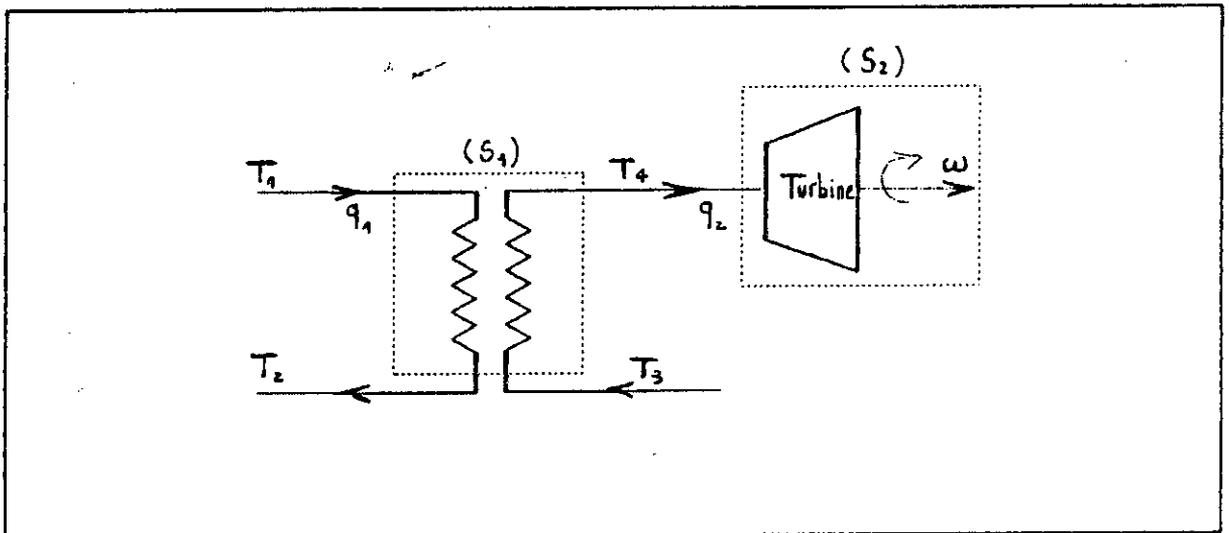
cette dernière est une équation différentielle non-linéaire.

I.V) Représentation d'état du système global :

Le modèle mathématique régissant le comportement dynamique du système (échangeur de chaleur + turbine à vapeur) est donné par le système d'équation suivant:

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= \frac{2C_{pf1}q_1 - h_{f1H}S}{m_{f1}C_{pf1}} T_1 - \frac{2C_{pf1}q_1 + h_{f1H}S}{m_{f1}C_{pf1}} T_2 + \frac{2h_{f1H}S}{m_{f1}C_{pf1}} T_H \\ \frac{dT_4}{dt} &= \frac{2h_{Hf2}S}{m_{f2}C_{pf2}} T_H - \frac{h_{Hf2}S}{m_{f2}C_{pf2}} T_4 + \left(\frac{2C_{pf2}}{m_{f2}C_{pf2}} T_3 - \frac{2C_{pf2}}{m_{f2}C_{pf2}} T_4 \right) q_2 - \frac{2h_{Hf2}ST_3}{m_{Hf2}C_{pf2}} \quad (2.19) \\ \frac{dT_H}{dt} &= \frac{h_{f1H}S}{2m_{Hf2}C_{pH}} T_2 + \frac{h_{Hf2}S}{2m_{Hf2}C_{pH}} T_4 - \frac{h_{f1H} + h_{Hf2}}{2m_{Hf2}C_{pH}} T_H + \frac{h_{f1H}S}{2m_{Hf2}C_{pH}} T_1 + \frac{h_{Hf2}ST_3}{2m_{Hf2}C_{pH}} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \left(\frac{k}{J} \right) \frac{q_2}{\omega} - \frac{\Gamma_r}{J} \end{aligned}$$

son schéma de principe est comme suit:



Fig(2.4): Schéma global du système à commander.

le sous-système (S1) peut être considéré comme un dispositif auxiliaire, assimilé à un organe d'adaptation pour le bon fonctionnement de la turbine.

En passant à une écriture plus simple et sous la forme standard [1]:

$$\dot{x} = X(x, u) \quad (2.20)$$

où : $x^T(t)$ est le vecteur d'état représenté par :

$$x^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [T_2 \ T_4 \ T_H \ \omega] \quad (2.21)$$

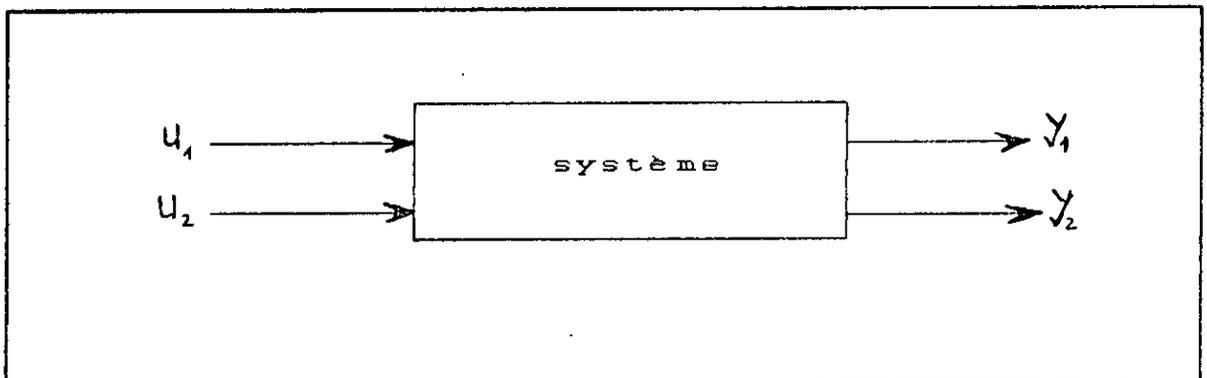
u est le vecteur de commande tel que :

$$u^T = [u_1 \ u_2] = [T_1 \ T_2] \quad (2.22)$$

et la sortie :

$$y = [y_1 \ y_2] = [T_4 \ \omega] \quad (2.23)$$

Donc le schéma bloc (entrées/sorties) du système est le suivant :



Fig(2.5): Schéma bloc entrées/sorties du système

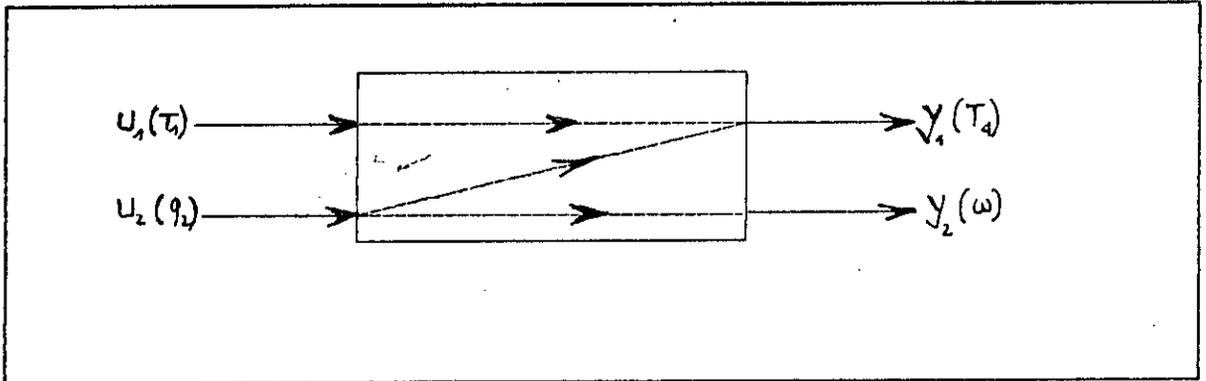
C'est un système multivariable (bicarré), dont la représentation d'état en x s'écrit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_3 x_3 - a_1 x_1 \\ b_3 x_3 - b_5 \\ c_1 x_1 + c_2 x_2 - c_3 x_3 + c_4 \\ -c_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 - b_4 x_2 \\ 0 \\ K/x_4 \end{bmatrix} u_2 \quad (2.24)$$

les expressions des coefficients et leurs valeurs respectives sont donnés en annexe I.

Le modèle ainsi écrit caractérise les systèmes non-linéaires.

Notre système (2.24) est multivariable, non linéaire et couplé Fig(2.6).



Fig(2.6): Interactions des entrées/sorties.

V) Simulation du système en boucle ouverte.

Afin de démontrer la validité de la formulation utilisée, nous avons testé le comportement du modèle en boucle ouverte fig(2.7a) et (2.8b).

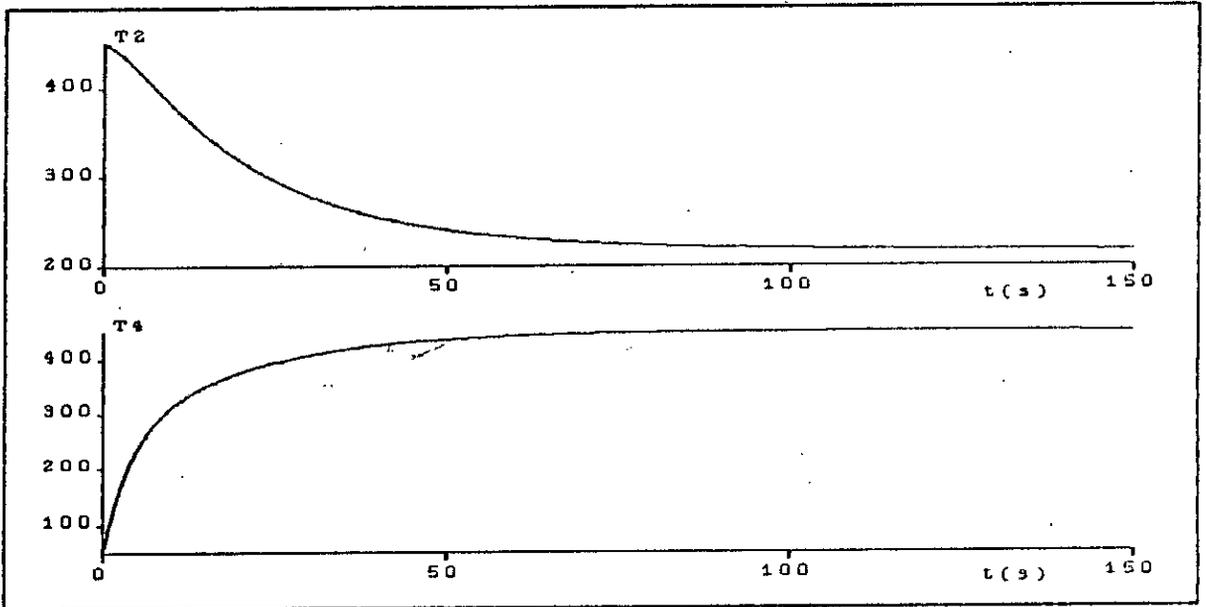
La simulation du sous-système S1 en boucle ouverte montre l'effet d'échange de chaleur thermique entre le primaire et le secondaire de l'échangeur fig(2.7a). En effet le fluide caloporteur voit son potentiel énergétique baisser pour céder de l'énergie thermique au fluide de travail. La figure(2.8b) montre l'évolution de la vitesse de rotation ω de la turbine dans le temps. Cette vitesse atteint une valeur de 3000 tr/mn (314 rd/s) pour assurer une fréquence du réseau électrique de 50 Hz. La figure (2.9a) et la figure(2.10) montrent l'effet de la perturbation sur les sous-systèmes S1 et S2.

VI) Conclusion:

Nous avons présenté dans ce chapitre les démarches successives que nous avons adoptées lors de la modélisation du système (échangeur de chaleur et turbine à vapeur). Chaque étape de cette étude correspond à une motivation particulière.

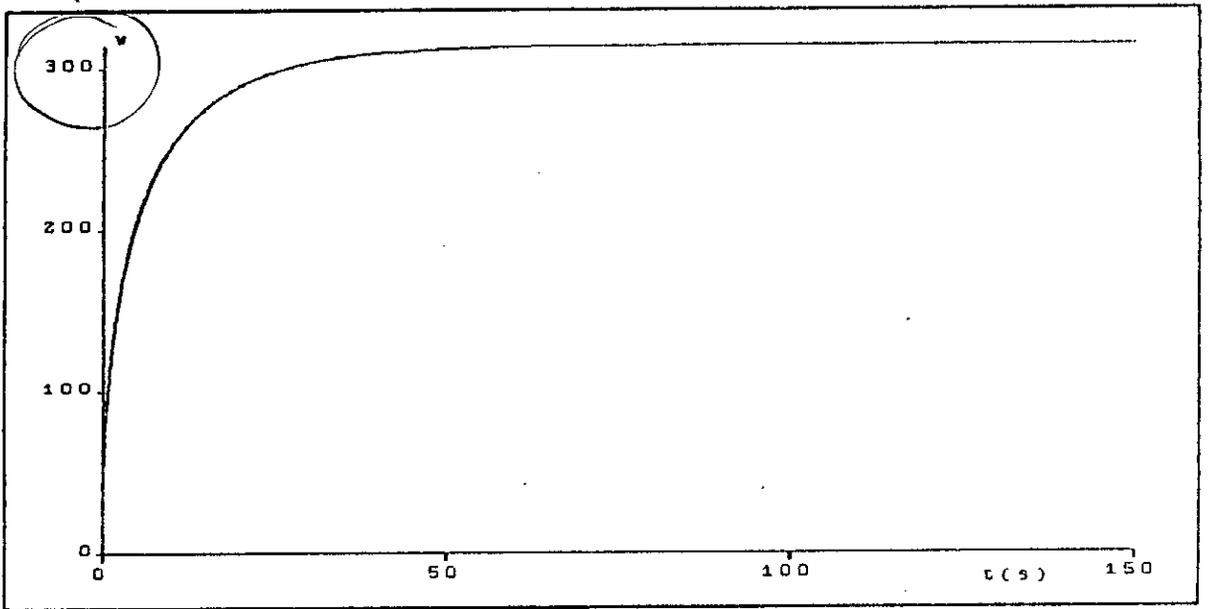
Le modèle "physique" du système est conçu dans le but de synthétiser une loi de commande pour réguler la vitesse de rotation de la turbine et la température de la vapeur en amont de cette dernière. Les résultats de la simulations en boucle ouverte, ont montré que le modèle peut représenter correctement le comportement du processus.

Le modèle que nous avons adopté est non linéaire, multivariable, couplé. Ceci nécessite donc pour la synthèse du réglage, de recourir aux techniques de la commande non linéaire, des systèmes multivariables, pour linéariser et découpler le système. On exposera donc dans le chapitre prochain, la théorie de la commande linéarisante des systèmes.

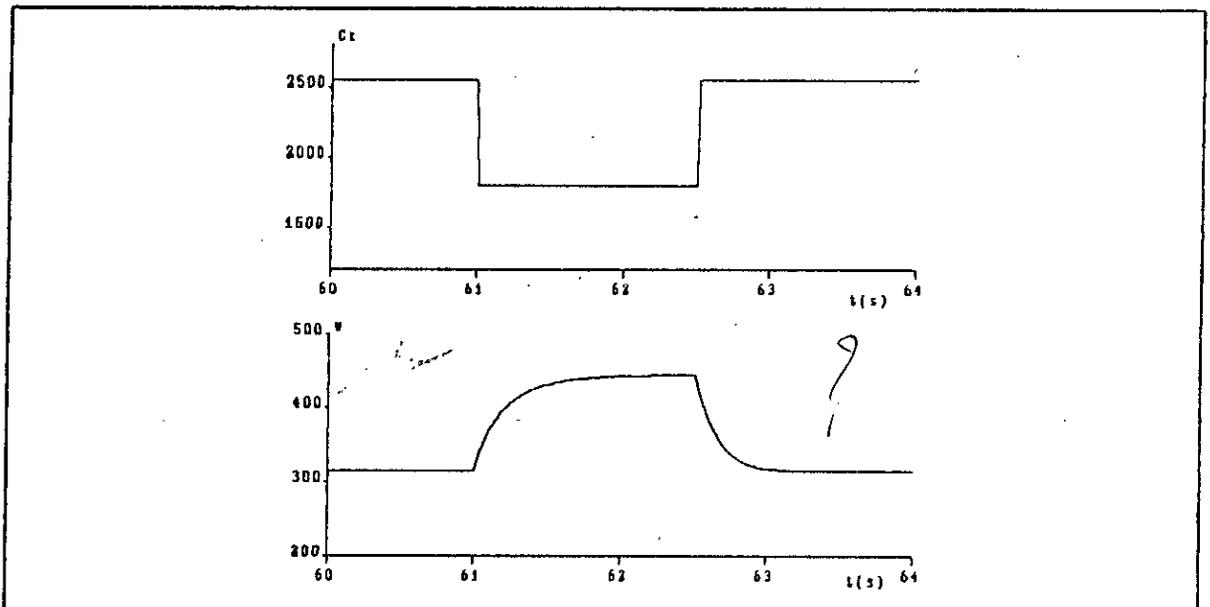


Fig(2.7): échange de chaleur dans le generateur de vapeur.

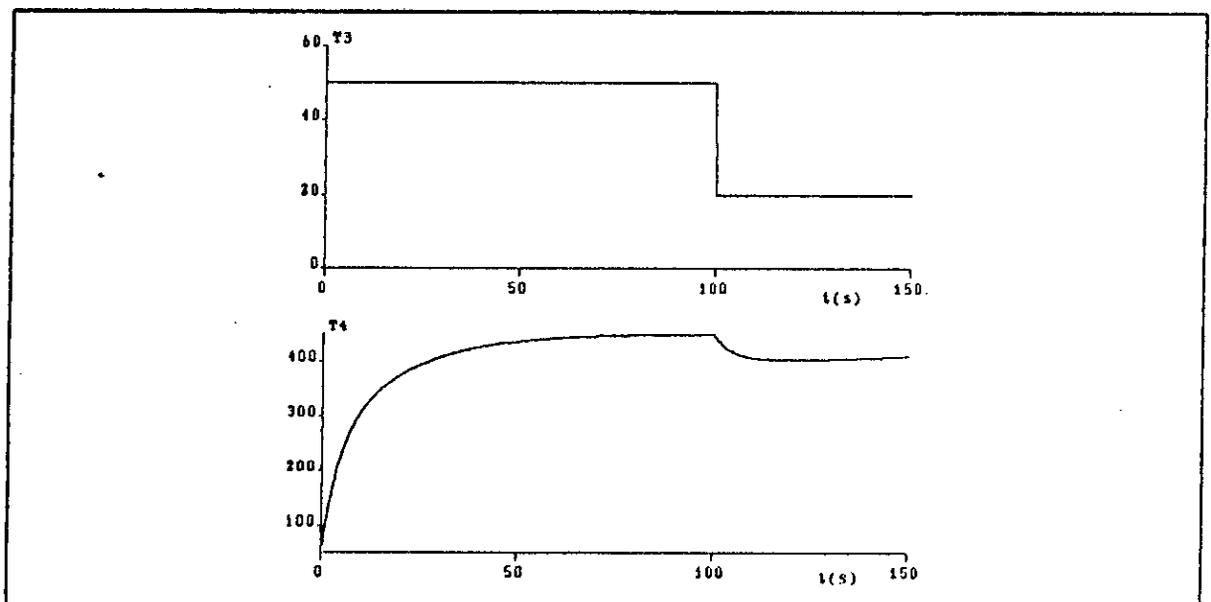
9, 2000/10/10



Fig(2.8): évolution de la vitesse de rotation de la turbine.



Fig(2.9): vitesse de rotation (w) en presence d'une perturbation.



Fig(2.10): effet de T_3 sur T_4 .

CHAPITRE III

**THEORIE DU BOUCLAGE
NON-LINEAIRE**

THEORIE DU BOUCLAGE NON LINEAIRE

III.1 SYSTEMES MONO-ENTREE / MONO-SORTIE

3.1.1 Introduction:

Les techniques de commande des systèmes non linéaires ont connu lors de ces dernières années un développement considérable.

En effet, plusieurs travaux ont été développés utilisant la géométrie différentielle comme outil de base.

Dans ce chapitre nous allons présenter la théorie de base qui traite une classe de systèmes non-linéaires dont l'équation d'état s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (3.1)$$

où x est le vecteur d'état, $f(x)$ et $h(x)$ sont des fonctions vectorielles différentiables de dimensions appropriées.

Le principe consiste à établir un bouclage non-linéaire qui linéarise le système après une transformation de coordonnées dans l'espace d'état. Ce bouclage ne doit pas être seulement linéarisant mais surtout stabilisant, cela en vérifiant une certaine condition concernant la notion du degré relatif, qui peut dans certain cas faire apparaître une partie non-observable dont la dynamique est dite dynamique des zéros. Pour valider la linéarisation on doit s'assurer de sa stabilité.

3.1.2 TRANSFORMATION LOCALE DES COORDONNEES:

Le but de cette section est de montrer comment un système non-linéaire SISO peut être localement donné, par une transformation appropriée des coordonnées dans l'espace d'état, sous la forme dite forme normale, laquelle plusieurs propriétés peuvent être illustrées.

3.1.3 Notion de degré relatif:

Soit le système (3.1). il est dit de degré relatif r en un point x^0 si :

- (i) $L_g L_f^k h(x) \neq 0 \forall x$ au voisinage de x^0 et $\forall k < r-1$
 - (ii) $L_g L_f^{r-1} h(x^0) \neq 0$
- (3.2)

Le degré relatif d'un système représente de façon générale le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie afin de faire apparaître explicitement l'entrée.

En effet, dérivons la sortie du système on obtient :

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} (f(x) + g(x)u)$$

$$= L_f h(x) + L_g h(x)u$$

si

$$L_g h(x)|_{x=x^0} = 0$$

alors $r=1$, si on dérive encore une fois:

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u$$

si

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} (f + g \cdot u) + \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial x} \cdot u \right)$$

$$= \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} (f) + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} g u + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial g}{\partial x} u$$

$$= \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} (f + g \cdot u) + \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial x} \cdot u \right)$$

$$L_g L_f h(x) |_{x=x^* \neq 0}$$

alors $r=2$.

si on continue encore:

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u$$

avec:

$$L_g L_f^{r-1} h(x) |_{x=x^* \neq 0}$$

Remarque:

Le degré relatif d'un système linéaire correspond à l'excès des pôles sur les zéros de la fonction de transfert.

En effet, supposons que la fonction de transfert associée à un système linéaire de la forme:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{3.3}$$

soit donné par la fonction de transfert:

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \\ &= a_m s^{-(n-m)} + C t s^{-(n-m)} + \dots \end{aligned} \tag{3.4}$$

d'autre part, en développant la forme générale:

$$\begin{aligned} H(s) &= C(sI - A)^{-1} B = C D s^{-1} + C A D s^{-2} + \dots + C A^{r-2} D s^{-r+1} + \\ & C A^{r-1} B s^{-r} + C A^r s^{-r-1} + \dots \end{aligned} \tag{3.5}$$

En prenant la définition du degré relatif r , c.à.d que:

$$Cb - CAB - C^2B - \dots - CA^{r-2}B = 0$$

on aura:

$$H(s) = CA^{r-1}Bs^{-1} + \dots \tag{3.7}$$

En identifiant (3.7) et (3.4) on déduit que: $r = n - m$

3.1.4 Forme normale:

Comme dans le cas des systèmes linéaires, les systèmes non-linéaire peuvent être aussi mis sous une forme canonique facile à manipuler appelée "forme normale". Cette dernière est basée sur une transformation de coordonnées non-linéaire autour d'un point de fonctionnemen, défini par:

$$\begin{aligned} z_1 - \phi_1(x) - h(x) \\ z_2 - \phi_2(x) - L_f h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} \cdot f(x) \\ &\vdots \\ z_r - \phi_r(x) - L_f^{r-1} h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} \cdot f^{(r-1)}(x) \end{aligned} \tag{3.8}$$

$\left. \begin{matrix} \vdots \\ r_1 \\ n \end{matrix} \right\} n-r$

Dans le cas ou le degré relatif r est inférieur à l'ordre n du système, nous pouvons toujours trouver les $n-r$ fonctions, $\phi_{(r+1)}(x), \dots, \phi_n(x)$, telles que l'application $\phi(x) = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T$ soit un difféomorphisme, on peut réécrire le système (3.1) par les nouvelles coordonnées et on obtient: $\circ \rightarrow ?$

En outre, les $n-r$ fonctions complémentaires $\phi_{(r+1)}, \dots, \phi_n$ sont choisies de telle manière que :

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x} g = L_g \phi_i(x) = 0 \quad \text{pour } \underline{r+1 \leq i \leq n} \tag{3.10}$$

Dans ce cas le système prend la forme suivante:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 - l_f h(x) - z_2 & \\ \dot{z}_2 - l_f^2 h(x) - z_3 & \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} + L_g L_f^{i-1} h(x) u$$

$$\dot{z}_r - l_f^r h(x) + l_g l_f^{r-1} h(x) u - b(z) + a(z) u \quad (3.9)$$

$$\dot{z}_{r+1} - l_f^{r+1} \phi_{r+1}(x) + l_g l_f^r \phi_{r+1}(x) u - q_{r+1}(z) + p_{r+1}(z) u$$

$$\dot{z}_n - q_n(z) + p_n(z) u$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 - z_2 \\ \dot{z}_2 - z_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_r - L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u \\ \dot{z}_{r+1} - q_{r+1}(z) \\ \vdots \\ \dot{z}_n - q_n(z) \end{cases} \quad (3.11)$$

cette forme est appelée forme normale. La figure (3.1) illustre un système écrit sous cette forme.

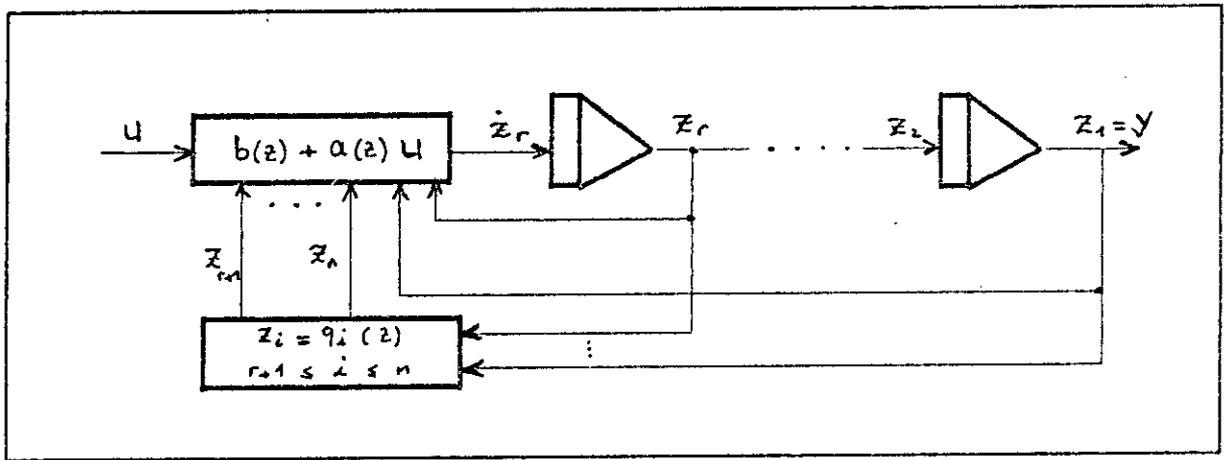


Fig (3.1): Forme normale.

3.1.5 LINEARISATION EXACTE PAR BOUCLAGE:

Afin de pouvoir utiliser les techniques de commande des systèmes linéaires, nous avons à trouver la relation qui lie la commande u à l'état x , supposé mesurable, et à une entrée de référence v pour obtenir un comportement Entrées/sorties linéaire. Cette relation est donnée par:

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \leftarrow \text{référence} \quad (3.12)$$

Ce qui donne en remplaçant dans (3.1):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)\alpha(x) + g(x)\beta(x)v \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Considérons un système ayant un degré relatif $r=n$, c.à.d exactement égal à la dimension du système, dans ce cas le changement de coordonnées nécessaire pour construire la forme normale est donnée par:

$$z = \phi(x) = \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \vdots \\ \phi_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{p-1} h(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

En choisissant la loi de commande comme suit:

$$u = \frac{1}{a(z)} (-b(z) + v) \quad (3.15)$$

avec:

$$\begin{aligned} a(z) &= L_g L_f^{p-1} h(x) \\ b(z) &= L_f^p h(x) \end{aligned} \quad (3.16)$$

le système va apparaître décrit par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{n-1} &= z_n \\ \dot{z}_n &= v \end{aligned} \tag{3.17}$$

C'est un système linéaire et commandable. Il peut être représenté par la figure(3.2)

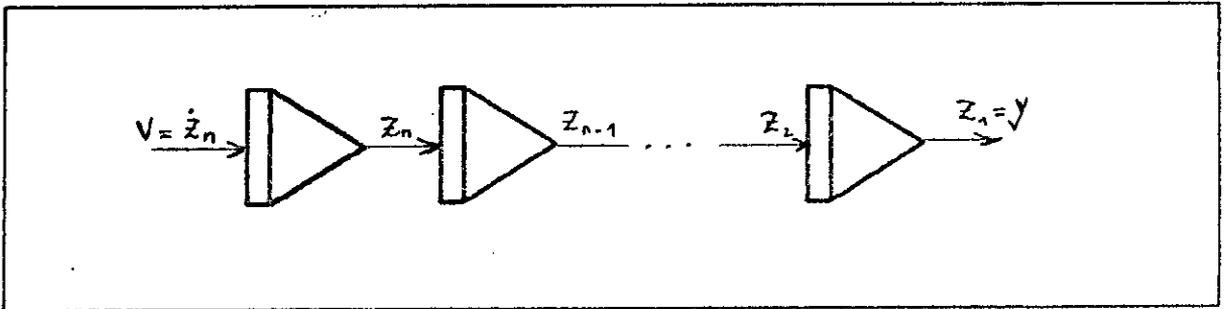


Fig (3.2): Linéarisation exacte.

Conclusion:

Tout système non-linéaire ayant un degré relatif n , en un point x^0 , peut être transformé en un système linéaire et commandable en un point $z^0 = \phi(x^0)$ en passant par deux étapes:

- Changement de base localement défini autour de x^0 (forme normale)
- Bouclage d'état approprié aussi défini autour de x^0 .

Remarque:

Sur le système linéaire ainsi obtenu on peut imposer un nouveau retour d'état par exemple fig(3.3):

$$v = Y_r - K^T Z$$

où $K^T = (k_0, k_1, \dots, k_{n-1})$ est choisi pour satisfaire un placement de pôles ou un critère d'optimalité.

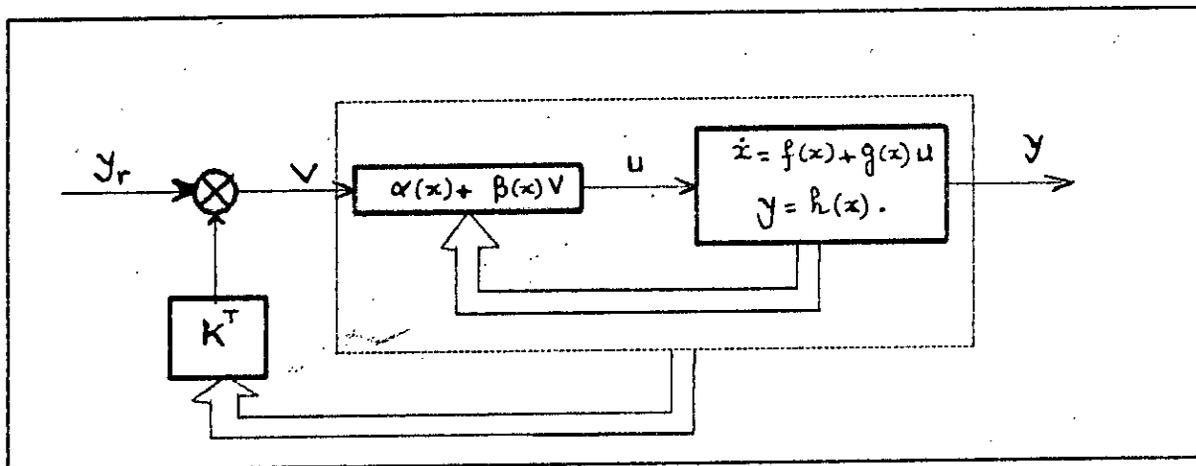


Fig (3.3): Commande d'un système linéarisé par retour d'état.

3.1.6 DYNAMIQUE DES ZEROS :

C'est la dynamique interne du système lorsque l'entrée et les conditions initiales sont choisies de telle manière que la sortie soit égale à zéros. Cette dynamique joue un rôle similaire à celui des zéros de la fonction de transfert d'un système linéaire.

soit le système (3.1) avec $r < n$ qui peut s'écrire en posant :

$$\xi = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_r \end{pmatrix} \quad \eta = \begin{pmatrix} z_{r+1} \\ z_{r+2} \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

sous la forme suivante:

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_1 &= z_2 \\
 \dot{z}_2 &= z_3 \\
 &\vdots \\
 \dot{z}_{r-1} &= z_r \\
 \dot{z}_r &= -b(\xi, \eta) + a(\xi, \eta) u \\
 \dot{\eta} &= -q(\xi, \eta) \\
 y &= z_1
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

où on a de (3.16):

$$\begin{aligned}
 a(\xi, \eta) &= L_g L f^{-1} h(x) |_{x=\phi^{-1}(z)} \\
 b(\xi, \eta) &= L f h(x) |_{x=\phi^{-1}(z)}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Soit u la commande qui porte la sortie à zéro à $t=t_0$ et l'y maintient. On vérifie facilement que:

$$y(t)=0 \text{ pour tout } t > t_0 \text{ implique } \xi(t)=0$$

donc $u(t)$ sera la solution unique de l'équation:

$$0 = -b(0, \eta) + a(0, \eta) u(t)$$

à savoir,

$$u(t) = -a^{-1}(0, \eta) + a(0, \eta)$$

En ce qui concerne l'état $\eta(t)$, on voit que si $\xi(0)$ et $\eta(0) \neq 0$ (pour écarter la solution triviale $(x^0, u^0) = (0, 0)$), alors $\eta(t)$ sera la solution de l'équation différentielle:

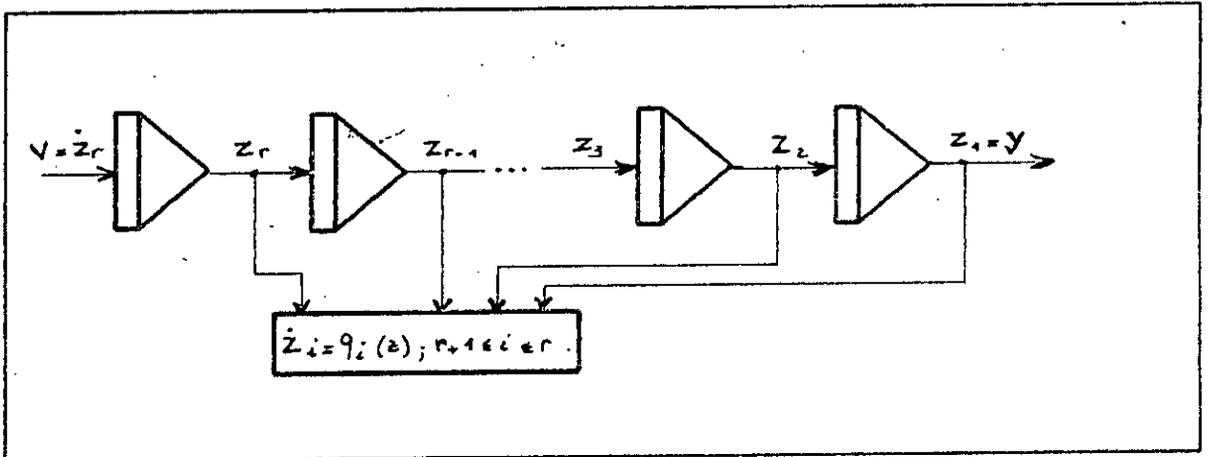
$$\begin{aligned}
 \dot{\eta}(t) &= -q(0, \eta(t)) \\
 \eta(0) &= \eta^0
 \end{aligned}$$

Cette dynamique s'appelle dynamique des zéros. Elle est dite inobservable parcequ'elle n'affecte pas la sortie fig(3.4).

Remarque:

Dans le cas linéaire, il s'agit de la dynamique des zéros de la fonction de transfert. Si cette dynamique est asymptotiquement

stable, on dit que le système est à minimum de phase.



Fig(3.4): Système partiellement linéarisé (dynamique des zéros).

stabilisation par retour d'état:

Supposons que la dynamique des zéros soit asymptotiquement stable, alors si on impose le retour d'état suivant:

$$u(t) = \frac{1}{a(\xi, \eta)} (-b(\xi, \eta) - c_0 z_1 - c_1 z_2 - \dots - c_{r-1} z_r) \tag{3.22}$$

où les coefficients $c_i (i=0, 1, \dots, r-1)$ sont fixés de telle sorte que le polynôme:

$$P(s) = c_0 + c_1 s + \dots + c_{r-1} s^{r-1} + s^r \tag{3.23}$$

soit de HURWITZ (c.à.d: ses racines sont situées sur le demi plan complexe gauche).

le système bouclé donné par:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= A\xi \\ \dot{\eta} &= q(\xi, \eta) \end{aligned} \tag{3.24}$$

où:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ -c_0 & -c_1 & \dots & -c_{r-2} & -c_{r-1} & \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

se trouve asymptotiquement stable.

III.2 SYSTEMES MULTI-ENTREE /MULTI-SORTIE

3.2.1 Introduction:

Nous nous intéressons à l'extension de la théorie développée antérieurement pour les systèmes mono-entrée/mono-sortie (SISO), aux systèmes multi-entrées/multi-sorties (MIMO). La classe de systèmes considérés possède un nombre égal d'entrées et de sorties. Ainsi, la forme condensée (3.1) s'écrit:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i \\ y_1 &= h_1(x) \\ &\vdots \\ y_m &= h_m(x) \end{aligned} \tag{3.26}$$

où $f(x), g_1(x), \dots, g_m(x)$ et $h_1(x), \dots, h_m(x)$ sont des fonctions analytiques définies au voisinage de x^0 .

3.2.2 Notion de degré relatif vectoriel:

Définition:

Le système de la forme (3.26) est dit de degré relatif vectoriel $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ au point x^0 si:

1) $L_{g_j} L_f^{r_i} h_i(x) = 0$ pour $1 \leq j \leq m$ et $\forall k \leq r_i$

2) La matrice carrée, appelée matrice de découplage:

$$A(x) = \begin{pmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

est non singulière au point $x=x^0$.

Le degré relatif r_i est exactement le nombre de fois qu'il faut dériver la $i^{\text{ème}}$ sortie $y_i(t)$ afin de faire apparaître au moins une entrée du vecteur u .

Remarque:

Dans le cas où la matrice de découplage est non-carrée, la deuxième condition est remplacée par:

$$\text{Rang } [A(x)] = n_s$$

où n_s est le nombre de sorties.

3.2.3 Forme normale:

soit le système (3.26) dont le degré relatif vectoriel $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ satisfait la condition suivante:

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_m < n$$

posons :

$$\begin{aligned} \phi_1^i(x) &= h_i(x) \\ \phi_2^i(x) &= L_f h_i(x) \\ &\vdots \\ \phi_{r_i}^i(x) &= L_f^{r_i-1} h_i(x) \\ 1 \leq i \leq m \end{aligned} \tag{3.28}$$

et on peut toujours choisir les $(n-r)$ fonctions $\phi_{(r+1)}(x), \dots, \phi_n(x)$ telles que :

$$L_{g_j} \phi_i(x) = 0 \quad r+1 \leq i \leq n \quad ; \quad 1 \leq j \leq m \tag{3.29}$$

afin de trouver la forme normale :

$$\begin{aligned} \xi_1^i &= \xi_2^2 \\ &\vdots \\ \xi_{r_i-1}^i &= \xi_{r_i}^i \\ \xi_{r_i-1}^i &= D_i(\xi, \eta) + \sum_{j=1}^m a_{ij}(\xi, \eta) u_j \\ y_i &= \xi_{r_i}^i \\ \dot{\eta} &= q(\xi, \eta) + \sum_{i=1}^m p_i(\xi, \eta) u_i \\ &\quad - p(\xi, \eta) + q(\xi, \eta) u_i \end{aligned} \tag{3.30}$$

où on a posé :

$$\eta_j = \phi_{r+j}(x) \quad 1 \leq j \leq n-r \tag{3.32}$$

$\xi = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^m)$ et $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n-r})$

$$\xi^i = \begin{pmatrix} \xi_1^i \\ \xi_2^i \\ \vdots \\ \xi_{r_1}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1^i(x) \\ \phi_2^i(x) \\ \vdots \\ \phi_{r_1}^i(x) \end{pmatrix} \quad 1 \leq i \leq m \quad (3.31)$$

avec

$$\begin{aligned} a_{ij}(\xi, \eta) &= L_{g_j} L_f^{r_1-1} h_i(\phi^{-1}(\xi, \eta)) \\ b_i(\xi, \eta) &= L_f^{r_1} h_i(\phi^{-1}(\xi, \eta)) \quad 1 \leq i, j \leq m \end{aligned} \quad (3.33)$$

Remarque:

le choix pris n'est possible que si la distribution engendrée par $\{g_1(x), \dots, g_m(x)\}$ est involutive, ceci implique que les $p_i(\xi, \eta)$ dans (3.30) vont être nuls.

3.2.4 Dynamique des zéros:

Soit un système dont le degré relatif vectoriel $\{r_1+r_2+\dots+r_m\}$ tel que:

$$r_1+r_2+\dots+r_m < n$$

L'idée est toujours de trouver les conditions initiales et l'entrée qu'il faut appliquer à l'instant t_0 pour maintenir la sortie nulle

$\forall t \geq t_0$, ainsi on analyse le comportement interne du système.

On montre facilement que si $y(t)=0$ alors $\forall t$:

$$\xi(t) = (\xi^1(t), \dots, \xi^m(t)) = 0^T \quad (3.34)$$

ce qui entraîne :

$$0 = b_i(0, \eta) + \sum_{j=1}^m a_{ij}(0, \eta) u_j(t) \quad \text{pour } 1 \leq i \leq m \quad (3.35)$$

En utilisant une représentation vectorielle, on trouve:

$$u(t) = -[A(0, \eta)]^{-1} b(0, \eta) \quad (3.36)$$

Ainsi la dynamique des zéros est donnée par:

$$\dot{\eta}(t) = q(\xi, \eta) - p(\xi, \eta) [A(0, \eta)]^{-1} b(0, \eta) \quad (3.37)$$

Avec la condition initiale:

$$\eta(0) = \eta^0 \quad (3.38)$$

3.2.5 LINEARISATION EXACTE PAR BOUCLAGE:

Nous allons illustrer comment le système (3.1) peut être transformé en un système linéaire et commandable par le moyen d'un bouclage et d'un changement de coordonnées dans l'espace d'état.

Choisissons une nouvelle entrée de référence v_1, v_2, \dots, v_m :

$$U_i = \alpha_i(x) + \sum_{j=1}^m \beta_{ij}(x) v_j \quad (3.39)$$

où α_i et β_{ij} ($1 \leq i, j \leq m$) sont des fonctions définies dans un ouvert de \mathbb{R}^n .

en utilisant l'expression condensée:

$$U = \alpha(x) + \beta(x) V$$

Le système en boucle fermée se trouve donné par:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)\alpha(x) + g(x)\beta(x)v \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (3.41)$$

en supposant que la matrice $\beta(x)$ est non-singulière $\forall x$. La loi de commande (3.40) est appelée retour d'état statique régulier.

Considérons un système (3.26) dont le degré relatif vectoriel obéit à cette condition:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_m = n \quad (3.42)$$

prenons le difféomorphisme :

$$Z = \Phi(x)$$

où :

$$\begin{aligned} \phi_k^i &= L_f^{-1} h_i(x) \quad 1 \leq i \leq m \\ & \quad 1 \leq k \leq r_i \end{aligned} \quad (3.43)$$

suivi d'un bouclage d'état statique:

$$U = -A^{-1}(x)b(x) + A^{-1}(x)V - \alpha(x) + \beta(x)V \quad (3.44)$$

ainsi on obtient un système linéaire commandable donné par:

Remarque:

- Le problème de linéarisation exacte est résolvable ssi:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_m = n$$

$$\xi_1^i = \xi_2^i$$

$$\dot{\xi}_{r_i-1}^i = \xi_{r_i}^i$$

$$\dot{\xi}_{r_i}^i = V_i$$

$$1 \leq i \leq m$$

(3.45)

c.à.d après difféomorphisme et bouclage le système se trouve linéaire et commandable.

•• Le système linéarisé se trouve sous la forme canonique de

BRUNOWSKY :

$$\dot{Z} = AZ + BV$$

$$y = CZ$$

(3.46)

où: $A = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_m)$ et $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_m)$

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, [r_i \times r_i]$$

(3.47)

$$b_i = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T, [r_i \times 1]$$

$C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_m)$

où : $c_i = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$

3.2.6) COMMANDE NON-INTERACTIVE :

Souvent en multivariable, on cherche une commande non-interactive annulant les interactions qui couplent le système, en le transformant en m sous-systèmes découplés. Nous allons montrer que l'objectif peut être atteint dans le cas non-linéaire.

Considérons toujours le système (3.26), le bouclage d'état donné par (3.40) où :

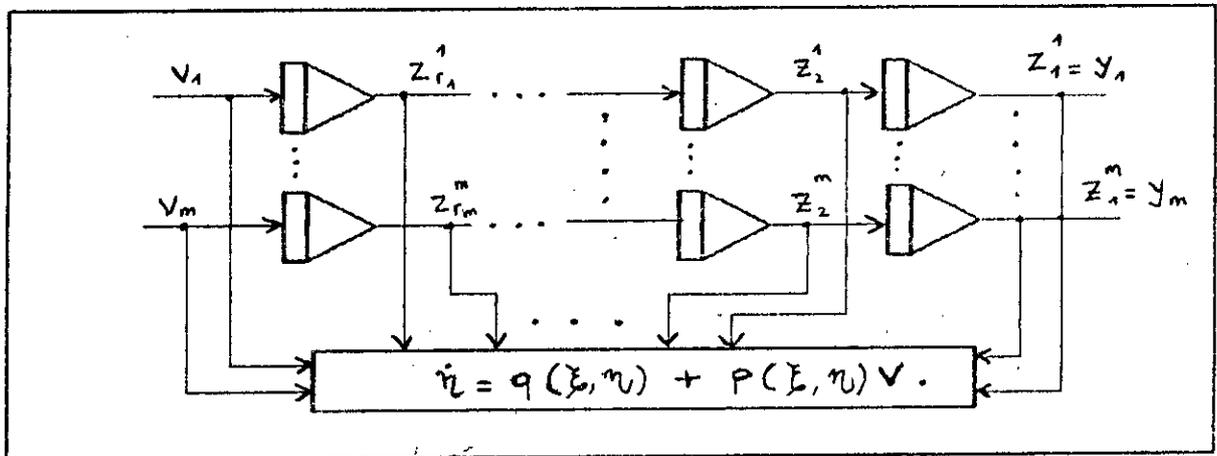
$$\begin{aligned} \alpha(x) &= -A^{-1}(x)B(x) \\ \beta(x) &= A^{-1}(x) \end{aligned} \quad (3.48)$$

assure un découplage standard, le fait que chaque sortie $y_i (1 \leq i \leq m)$ se trouve affectée par une entrée de référence v_i seulement, à travers r_i intégrateurs.

selon le degré relatif, on peut envisager deux cas :

$$\star \sum_{i=1}^m r_i < n$$

une partie non-observable existe en boucle fermée qui n'a aucun effet sur les sorties fig(3.5).



Fig(3.10): Découplage entrées-sorties.

$$** \sum_{i=1}^m r_i - n$$

Le comportement est complètement découplé. La matrice de transfert est donnée par:

$$H(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^{r_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s^{r_2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s^{r_n}} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

Remarque:

• La non-singularité de la matrice (3.2) de découplage est une condition nécessaire et suffisante pour linéariser et découpler le système.

• Une fois le système est découplé, un bouclage additif donné par:

$$V_i = -C_0^i \xi_1^i - \dots - C_{r_1-1}^i \xi_{r_1}^i + V_1 \quad (3.50)$$

9

où: C^i_j sont des coefficients réels.

Ce retour d'état peut stabiliser le système après avoir vérifié la stabilité de la dynamique des zéros.

3.2.7) NOTIONS SUR LE BOUCLAGE STATIQUE ET DYNAMIQUE:

Selon que la matrice de découplage donnée par (3.27) soit singulière ou non, on peut envisager deux types de bouclages.

a) Bouclage statique:

Le bouclage statique est un bouclage dont la commande u dépend seulement de l'état du système x et de la nouvelle entrée v , si la matrice de découplage est non singulière alors le bouclage linéarisant donné par (3.44) peut s'écrire:

$$U = -A^{-1}(x) \begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ L_f^{r_2} h_2(x) \\ \vdots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{pmatrix} + A^{-1}(x) V \quad (3.51)$$

Ce bouclage non-linéaire est dit statique. Il rend le système bouclé sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} y_1^{r_1} \\ y_2^{r_2} \\ \vdots \\ y_m^{r_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

b) Bouclage dynamique:

C'est un bouclage dont la commande u est composée par une sortie d'un système dynamique, l'état du système est une entrée de référence v .

Il peut être donné par:

$$\begin{aligned} u &= \alpha(x, \xi) + \beta(x, \xi) v \\ \dot{\xi} &= \gamma(x, \xi) + \delta(x, \xi) v \end{aligned} \quad (3.53)$$

où ξ une variable d'état additionnelle.

Dans le cas où la matrice $A(x)$ est singulière (le degré relatif n'existe pas), alors la linéarisation si elle est possible, ne peut se faire que par bouclage dynamique qui consiste à faire augmenter le rang de $A(x)$ jusqu'à m , ainsi le degré relatif du système étendu existera.

A noter que l'addition d'une intégration sur une certaine entrée aide beaucoup à obtenir un degré relatif. Nous allons décrire une procédure qui identifie la voie où on doit insérer des intégrateurs, et le nombre de ceux-ci.

Algorithme de l'extension dynamique:

Considérons la matrice $A(x)$ définie par (3.27) dont le rang est q où $q < m$. Les deux fonctions analytiques $\alpha(x, \xi)$ et $\beta(x, \xi)$ de l'équation (3.53) sont données par:

$$L_{f+g\beta} L_f^{i-1} h_1(x) = 0 \quad 1 \leq i \leq q$$

$$L_{g\beta_j} L_f^{j-1} h_1(x) = \delta_{ij} \quad 1 \leq j \leq m$$

posons:

$$\begin{aligned} \xi &= [\xi_1 \xi_2 \dots \xi_q]^T \\ V' &= [V_1 V_2 \dots V_q]^T \\ V'' &= [V_{q+1} V_{q+2} \dots V_m]^T \end{aligned} \quad (3.54)$$

Prenons $\beta'(x)$ (respectivement $\beta''(x)$) la matrice formée par les premières q colonnes (respectivement les dernières $q-m$ colonnes) de $\beta(x)$. D'où le bouclage dynamique:

$$\begin{aligned} U &= \alpha(x) + \beta'(x) \xi + \beta''(x) V \\ \dot{\xi} &= V' \end{aligned} \quad (3.55)$$

On aura le système en boucle fermée correspondant:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) \alpha(x) + g(x) \beta'(x) \xi + g(x) \beta''(x) V'' \\ \dot{\xi} &= V' \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad 3.56$$

Conclusion:

Ce chapitre est un rappel de la théorie des systèmes non-linéaires sous l'angle géométrie différentielle en vue de l'application à notre système physique.

L'application de notion de géométrie différentielle et les outils correspondants tels que la dérivée de lie et les crochets de lie, permettant la synthèse de la loi de commande non-linéaire

Sous certaines conditions, il est possible de trouver un retour d'état non-linéaire permettant de linéariser localement ou exactement le système non-linéaire.

La théorie des systèmes non-linéaire M.I.M.O n'est qu'une extension au cas multivariable de la théorie des systèmes SISO, son avantage réside dans le faite qu'avec le même bouclage on peut assurer la linéarisation et le découplage Entrée/Sortie.

Remarque:

La référence de base concernant la théorie développée dans ce chapitre est [1] : Isidori "non linear control systems"

CHAPITRE IV

SYNTHESE DE LA COMMANDE NON-LINEAIRE

synthèse de la commande non-linéaire

IV.1) Introduction:

Après avoir présenté la théorie du bouclage non linéaire, nous appliquerons dans le présent chapitre, cette technique en vue de linéariser et de découpler le système; dont le modèle a été établi au chapitre II.

IV.2) Synthèse de la commande linéarisante:

Etant donné le modèle mathématique du système équation (), écrit sous la forme :

$$\dot{x} = X(x, u) = f(x) + g(x)u \quad (4.1)$$

avec:

$$x^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \quad , \quad u^T = [u_1 \ u_2]$$
$$f(x) = \begin{bmatrix} a_3 x_3 - a_1 x_1 \\ b_3 x_3 - b_2 x_2 - b_5 \\ c_1 x_1 + c_2 x_2 - c_3 x_3 + c_4 \\ -C_r \end{bmatrix} \quad , \quad g(x) = \begin{bmatrix} a_2 & 0 \\ 0 & b_1 - b_4 x_2 \\ c_1 & 0 \\ 0 & K/x_4 \end{bmatrix}$$

$$y_1 = h_1(x) = x_2 \quad , \quad y_2 = h_2(x) = x_4$$

IV.2.1) Bouclage statique:

a) Calcul du degré relatif vectoriel:

On dérive les sorties assez de fois jusqu'à faire apparaître au moins l'une des deux commandes:

$$\dot{Y}_1 = L_X h_1(x) = L_{f+g} h_1(x) = L_f h_1(x) + L_g h_1(x) u \\ = (D_3 x_3 - D_2 x_2 - D_5) + (D_1 - D_4 x_2) u_2$$

avec : $D_1 - D_4 x_2 \neq 0$

$r_1 = 1$

$$\dot{Y}_2 = L_X h_2(x) = L_f h_2(x) + L_g h_2(x) u \\ = -C_r + \frac{K}{x_4} u_2$$

$r_2 = 1$

b) Matrice de découplage:

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} h_1(x) & L_{g_2} h_1(x) \\ L_{g_1} h_2(x) & L_{g_2} h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (D_1 - D_4 x_2) \\ 0 & K/x_4 \end{bmatrix}$$

$$\det A(x) = 0$$

La matrice de découplage $A(x)$ est singulière (déterminant nul), donc le degré relatif vectoriel n'existe pas. La synthèse de la commande par bouclage ne peut donc s'appliquer.

statique

IV.2.2) Bouclage dynamique:

La raison pour laquelle le système ne possède pas un degré relatif, est l'affectation des dérivées de y_1 et y_2 par l'entrée u_2 uniquement. Alors on doit retarder l'apparition de u_2 jusqu'à

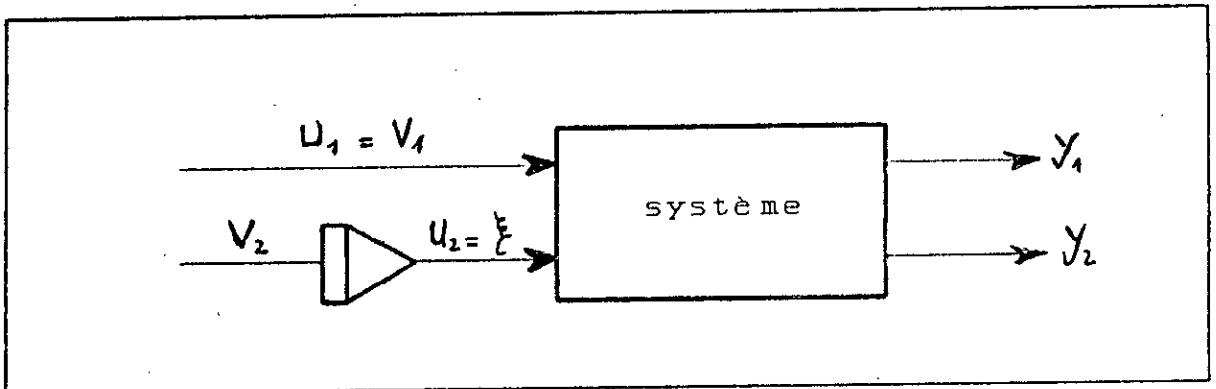
ce que les deux commandes apparaissent en même temps. Le plus simple moyen est d'insérer une intégration sur la voie de u_2 fig (4.1).

on posera alors:

$$u_2 = \xi - x_5$$

$$\dot{\xi} = v_2 - x_5$$

$$u_1 = v_1$$



fig(4.1) :schéma du système étendu

Le système étendu par l'état auxiliaire s'écrit:

$$\dot{\tilde{x}} = f(\tilde{x}) + \tilde{g}(\tilde{x})v$$

où :

$$\tilde{x}^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] \quad , \quad v^T = [v_1 \ v_2]$$

avec :

$$\tilde{f}(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} a_3 x_3 - a_1 x_1 \\ D_3 x_3 - D_2 x_2 + (D_1 - D_4 x_2) x_5 - D_5 \\ C_1 x_1 + C_2 x_2 - C_3 x_3 + C_4 \\ k \frac{x_5}{x_4} - C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \tilde{g}(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} a_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ C_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Utilisons les méthodes du bouclage dynamique au système modifié.

a) recherche du degré relatif:

$$\dot{Y}_1 - L_{\tilde{x}}h_1(x) - L_{\tilde{f}}h_1(x) + L_{\tilde{g}}h_1(x)v \\ -b_3x_3 - b_2x_2 + (b_1 - b_4x_2)x_5 - b_5$$

$$\ddot{Y}_1 - L_{\tilde{x}}L_{\tilde{f}}h_1(\tilde{x}) - L_{\tilde{f}}^2h_1(\tilde{x}) + L_{\tilde{g}}L_{\tilde{f}}h_1(\tilde{x})v \\ -b_3(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4) - ((b_2 + b_4x_5)(b_3x_3 - b_2x_2 + \\ + (b_1 - b_4x_2)x_5 - b_5) + b_3c_1v_1 + (b_1 - b_4x_2)v_2$$

le degré relatif par rapport à $h_1(x)$ est : $r_1=2$

$$\dot{Y}_2 - L_{\tilde{x}}h_2(\tilde{x}) - L_{\tilde{f}}h_2(\tilde{x}) + L_{\tilde{g}}h_2(\tilde{x}) \\ -K \frac{x_5}{x_4} - C_r$$

$$\ddot{Y}_2 - L_{\tilde{x}}L_{\tilde{f}}h_2(\tilde{x}) - L_{\tilde{f}}^2h_2(\tilde{x}) + L_{\tilde{g}}L_{\tilde{f}}h_2(\tilde{x})v \\ -K \frac{x_5}{x_4} (K \frac{x_5}{x_4} - C_r) + \frac{K}{x_4}v_2$$

le degré relatif par rapport à $h_2(x)$ est $r_2=2$

b) matrice de découplage:

$$A(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} b_3c_1 & b_1 - b_4x_2 \\ 0 & \frac{K}{x_4} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\det A(x) = b_3c_1k/x_4 \neq 0$$

$A(x)$ est une matrice non singulière, d'où le degré relatif vectoriel est (2,2): $r_1+r_2 = 4 < 5$

on aura donc une dynamique des zéros d'ordre 1. Ainsi la linéarisation ne peut être que partielle.

Ainsi on applique le bouclage dynamique donné par (3.51):

$$V = A^{-1}(\tilde{X}) \left(W - \begin{bmatrix} L_f^2 h_1(\tilde{X}) \\ L_f^2 h_2(\tilde{X}) \end{bmatrix} \right) \quad (4.4)$$

avec:

$$W^T = [W_1 \ W_2]$$

et:

$$A^{-1}(\tilde{X}) = \frac{1}{\det A(\tilde{X})} \begin{bmatrix} L_{\tilde{g}_2} L_{\tilde{f}} h_2(\tilde{X}) & -L_{\tilde{g}_2} L_{\tilde{f}} h_1(\tilde{X}) \\ -L_{\tilde{g}_1} L_{\tilde{f}} h_2(\tilde{X}) & L_{\tilde{g}_1} L_{\tilde{f}} h_1(\tilde{X}) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{D_3 C_1} & \frac{(D_4 X_2 - D_1) X_4}{D_3 C_1 K} \\ 0 & \frac{X_4}{K} \end{bmatrix}$$

La commande non linéaire qu'on appliquera au système afin d'assurer le découplage et la linéarité s'écrit donc:

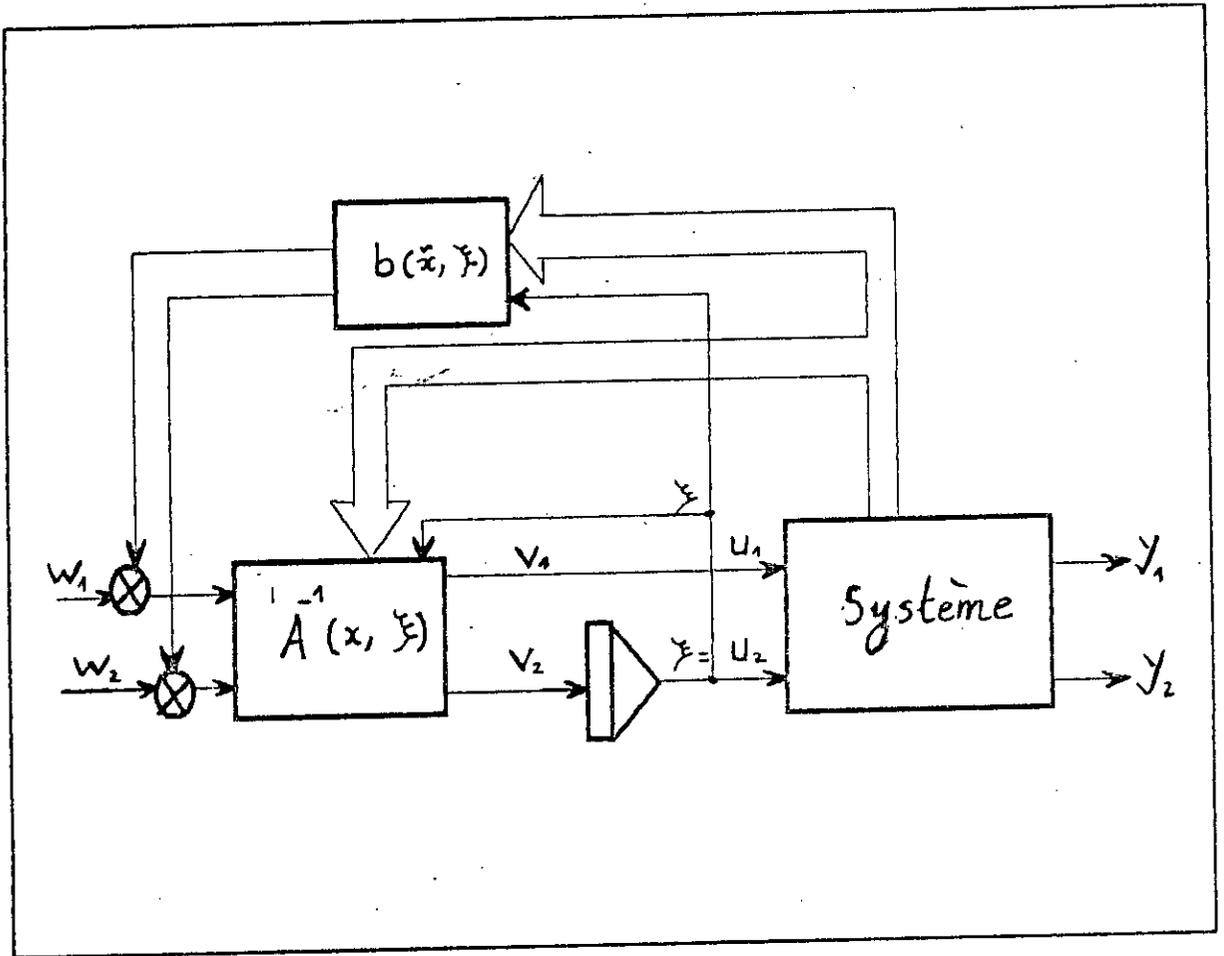
$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_1 - L_f^2 h_1(\tilde{X})}{D_3 C_1} + \frac{(W_2 - L_f^2 h_2(\tilde{X})) (D_4 X_2 - D_1) X_4}{D_3 C_1 K} \\ (W_2 - L_f^2 h_2(\tilde{X})) \frac{X_4}{K} \end{bmatrix}$$

où:

$$L_f^2 h_1(\tilde{X}) = b_3 (C_1 X_1 + C_2 X_2 - C_3 X_3 + C_4) - (D_2 + D_4 X_5) (D_3 X_3 - D_2 X_2 + (D_1 X_2 - D_4 X_2) X_5 - D_5)$$

$$L_f^2 h_2(\tilde{X}) = -K \frac{X_5}{X_4} (K \frac{X_5}{X_4} - C_r)$$

La structure générale de la commande linéarisante par bouclage dynamique est donnée par la figure(4.2).



Fig(4.2): structure générale de la commande linéarisante.

c) Transformation locale de coordonnées:

Transformons les coordonnées du système par le difféomorphisme:

$$Z = \Phi(x) = [h_1(x) \quad L_{\tilde{f}}h_1(x) \quad h_2(x) \quad L_{\tilde{f}}h_2(x) \quad \phi_5(x)] \quad (4.7)$$

$$= [y_1 \quad \dot{y}_1 \quad y_2 \quad \dot{y}_2 \quad \phi_5(\tilde{x})]$$

où :

$$\phi_5(x) = c_1 x_1 - a_2 x_3 \quad (4.8)$$

$\phi_5(x)$ satisfait la condition (3.10) : $L_{g_1} \phi_5(x) = 0$

et de plus $\Phi(x)$ est non singulière. Par conséquent la transformation $z = \Phi(x)$ est difféomorphe.

on a donc posé :

$$\begin{aligned} z_1 &= \phi_1(x) = x_2 \\ z_2 &= \phi_2(x) = b_3 x_3 - b_2 x_2 + (b_1 - b_4 x_2) - b_5 \\ z_3 &= \phi_3(x) = x_4 \\ z_4 &= \phi_4(x) = K \frac{x_5}{x_4} - C_r \\ z_5 &= \phi_5(x) = c_1 x_1 - a_2 x_3 \end{aligned} \quad (4.9)$$

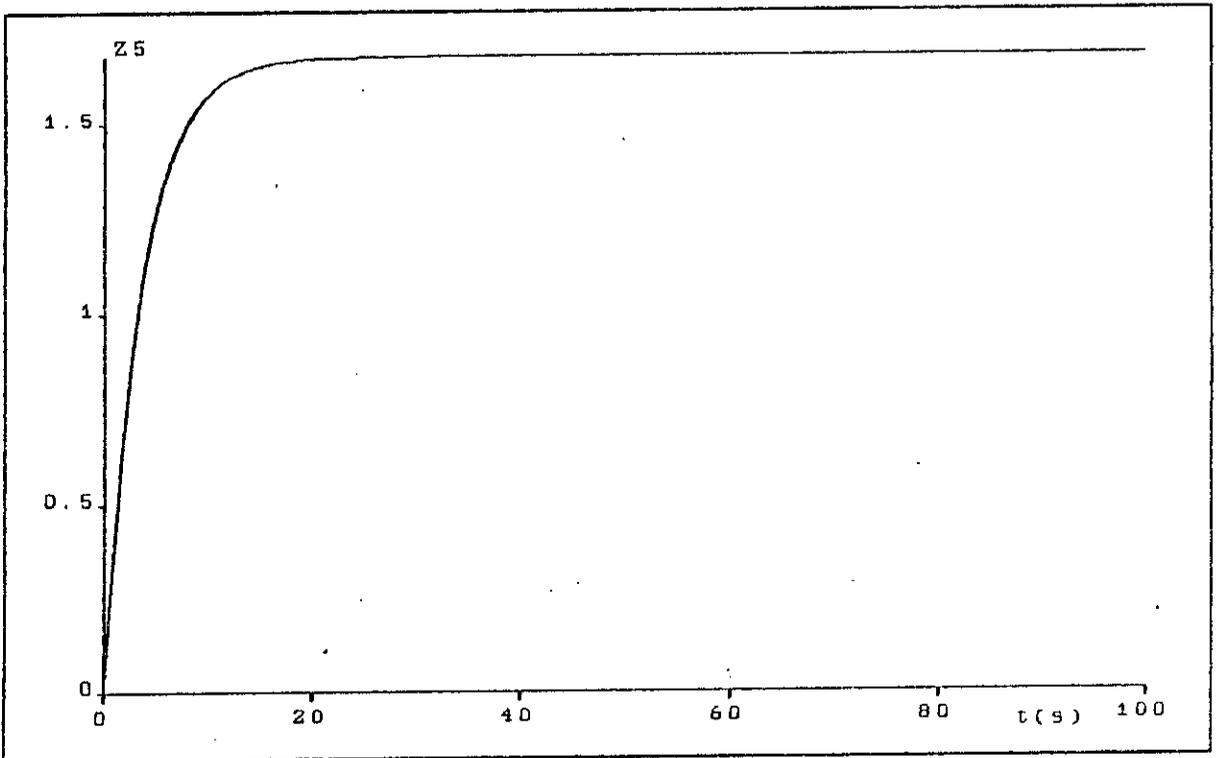
La transformation inverse $\Phi^{-1}(z) = x$ s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{a_2}{c_1 b_3} \left(z_2 + b_2 z_1 - \frac{(b_1 - b_4 z_1)(z_4 + C_r) z_3 + b_5}{K} \right) + \frac{z_5}{c_1} \\ x_2 &= z_1 \\ x_3 &= \frac{1}{b_3} \left(z_2 + b_2 z_1 - \frac{(b_1 - b_4 z_1)(z_4 + C_r) z_3 + b_5}{K} \right) \\ x_4 &= z_3 \\ x_5 &= \frac{(z_4 + C_r) z_3}{K} \end{aligned} \quad (4.10)$$

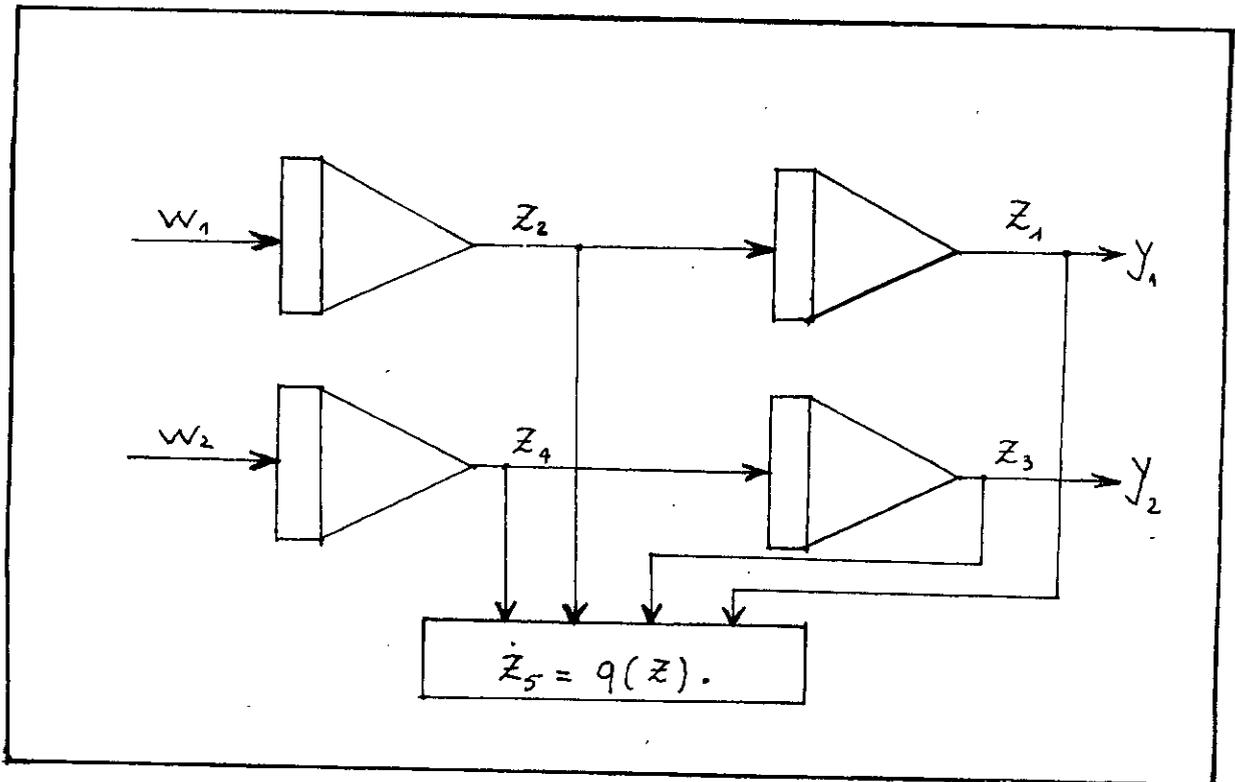
Le système partiellement linéarisé (fig(4.4)) sera décrit par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \dot{Z}_1 &= Z_2 \\
 \dot{Z}_2 &= W_1 \\
 \dot{Z}_3 &= Z_4 \\
 \dot{Z}_4 &= W_2 \\
 \dot{Z}_5 &= \frac{(C_1 a_3 + a_2 C_3 - a_1 a_2 - a_2^2)}{D_3} (Z_2 + D_2 Z_1) \\
 &\quad - \frac{(D_1 - D_4 Z_1)(Z_4 + C_r) Z_3 + D_5}{K} - (a_1 + a_2) Z_5 \\
 &\quad - a_2 C_2 Z_1 - a_2 C_4
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Cette dernière équation représente la dynamique non linéaire inobservable (dynamique des zéros), qui n'affecte pas la sortie et qui doit être stable. La figure(4.3) montre la stabilité de la dynamique des zéros.



Fig(4.3): stabilité de la dynamique des zéros.

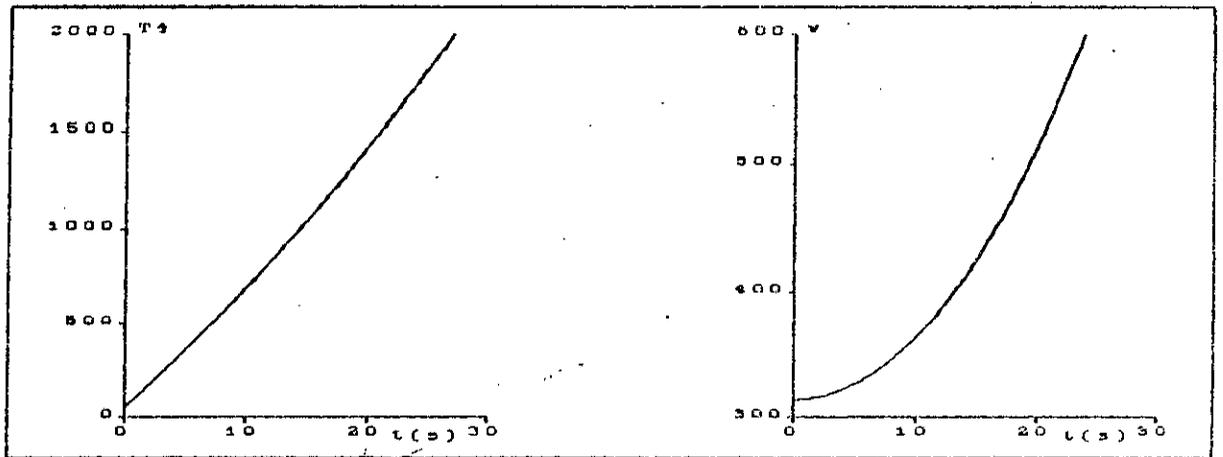


Fig(4.4): système découplé et Linéarisé.

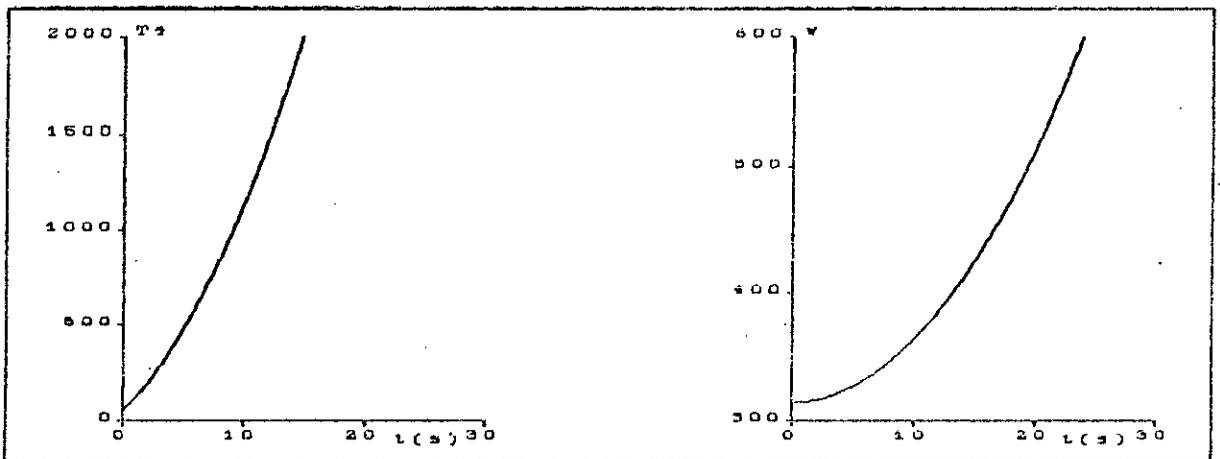
IV.3) Conclusion:

La synthèse de la commande linéarisante, nous a permis de linéariser et découpler le système. Ce dernier est rammené par une transformation locale de coordonnées à deux sous-systèmes indépendants (découplés) ayant chacun un comportement double intégrateur fig(4.5). Le découplage est vérifié en observant les réponses des sorties du système à un changement d'une seule entrée à la fois fig(4.6a) et fig(4.6b). On remarque en effet, que V_1 agit uniquement sur y_1 et V_2 uniquement sur y_2 .

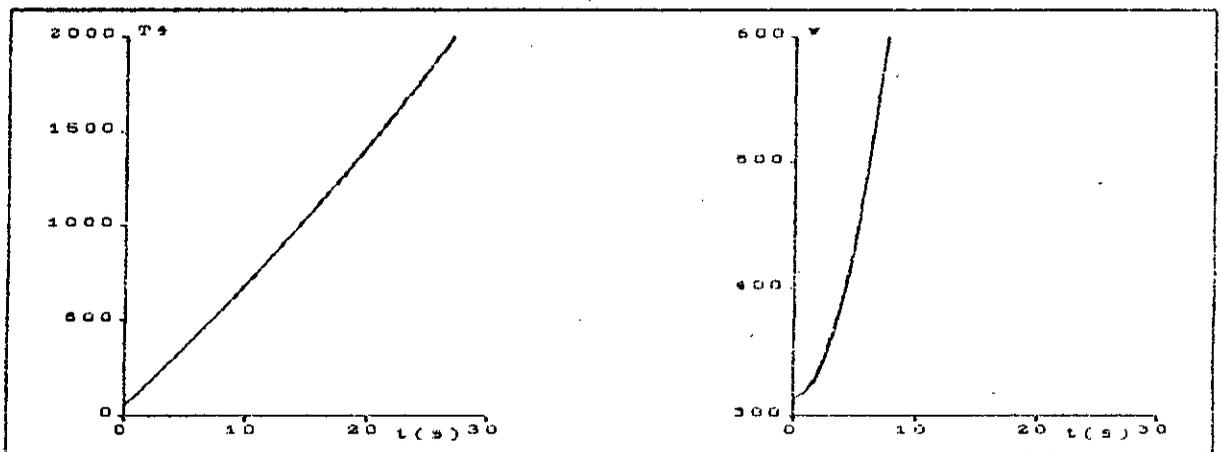
La figure(4.3) représente la dynamique interne du système (dynamique des zéros). Celle-ci vérifie la condition de stabilité et confirme le bon choix de la transformation difféomorphique.



Fig(4.5):comportement double intégrateure



Fig(4.6a):effet de V1 sur les sorties (V1=10;V2=1).



Fig(5.6b):effet de V2 sur les sorties (V1=1;V2=10).

CHAPITRE V

COMMANDE DU SYSTEME

Commande du système

V.1) Introduction

Après avoir linéarisé et découplé le système, la conception des commandes des sous systèmes (S1 et S2) peut être faite indépendamment [1] [8], en utilisant les techniques de commandes linéaires. En ce qui nous concerne, on optera pour la commande par placement de pôles (retour d'état) et la commande classique; on définira alors la structure de réglage optimale, qu'on adoptera pour la régulation de la vitesse de rotation de la turbine, et de la température de sortie dans le secondaire de l'échangeur de chaleur.

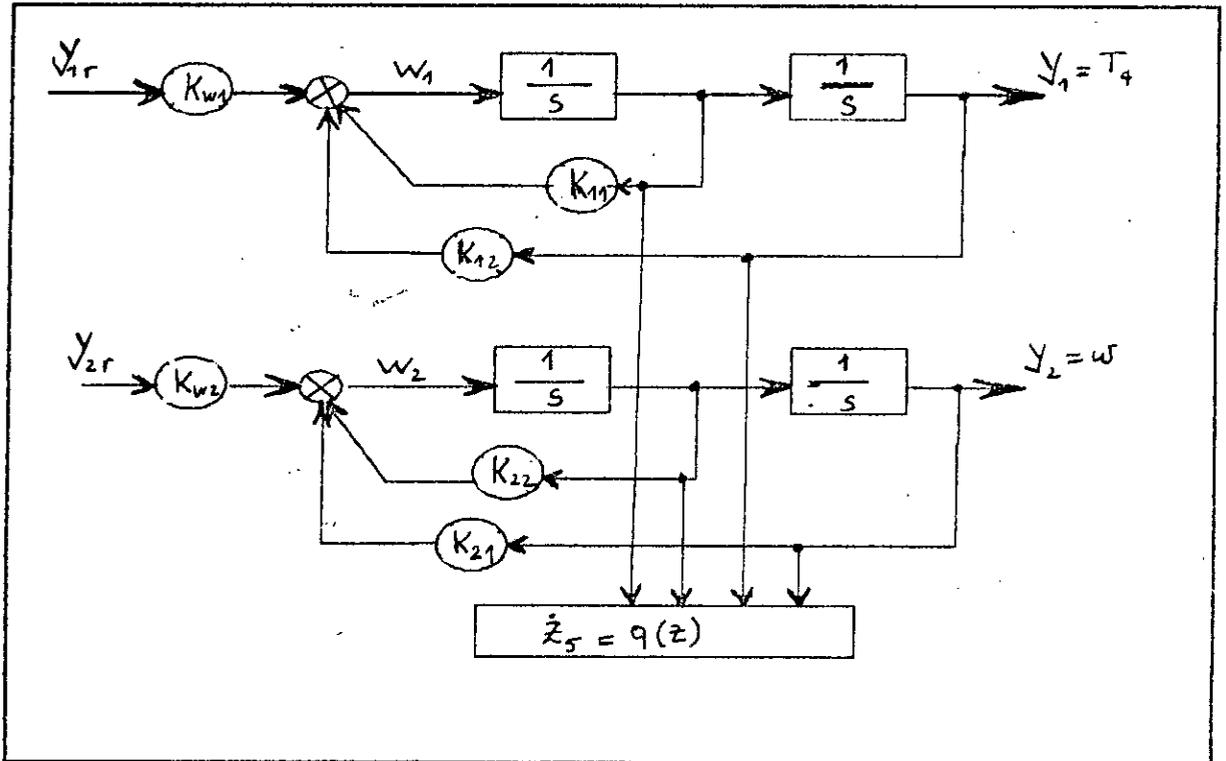
V.2) Réglage par retour d'état

Les méthodes modernes de commande par retour d'état supposent que l'on connaisse les variables d'état; et moyennant l'usage généralisé du calcul matriciel, le comportement dynamique du système peut être entièrement décrit à l'aide de ses variables d'état [2] [4].

V.2.1) Structure de la commande

Cette commande consiste à imposer la dynamique désirée par un retour d'état, dont les coefficients sont déterminés par un placement de pôles de la fonction de transfert en boucle fermée fig(5.1).

Les spécifications techniques issues du cahier de charge imposent un réglage optimal pour un déléstage maximal de 50% et une surcharge maximale de 25%.



Fig(5.1): Commande par retour d'état.

Ainsi la dynamique imposée se trouve régie par la matrice de transfert en boucle fermée:

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_{w1}}{K_{12} + K_{11}S + S^2} & 0 \\ 0 & \frac{K_{w2}}{K_{21} + K_{22}S + S^2} \end{bmatrix}$$

où les coefficients K_i sont déterminés par un placement de pôles optimal, tel que:

$$K_1 = P_1 + P_2 = 2 \xi \omega_n$$

$$K_2 - P_1 P_2 - K_v = \omega_n^2$$

Avec $\xi = 0.7071$, on aura donc à placer des pôles complexes. Le choix de ω_n se fera, de tel manière qu'en présence des perturbations, la vitesse de rotation de la turbine ne s'écarte pas plus de 10 % de sa valeur nominale, et d'autre part la température T_a de la vapeur d'eau à l'entrée de la turbine ne doit pas excéder 5 % de sa valeur de consigne (435°C).

V.2.2) Résultats de la simulation et commentaires:

Lors du placement de pôles, la simulation du système en boucle fermée, avec le réglage par retour d'état, a montré que plus les pôles s'éloignaient de l'axe imaginaire, plus vite est la régulation et la stabilisation des sorties du système.

les résultats obtenus confirment clairement la nature linéaire et découplée du système en boucle fermée; les réponses sont satisfaisantes du point de vue rejet des perturbations (voir fig(5.3a), fig(5.4a) et fig(5.5a)).

V.3) Réglage classique:

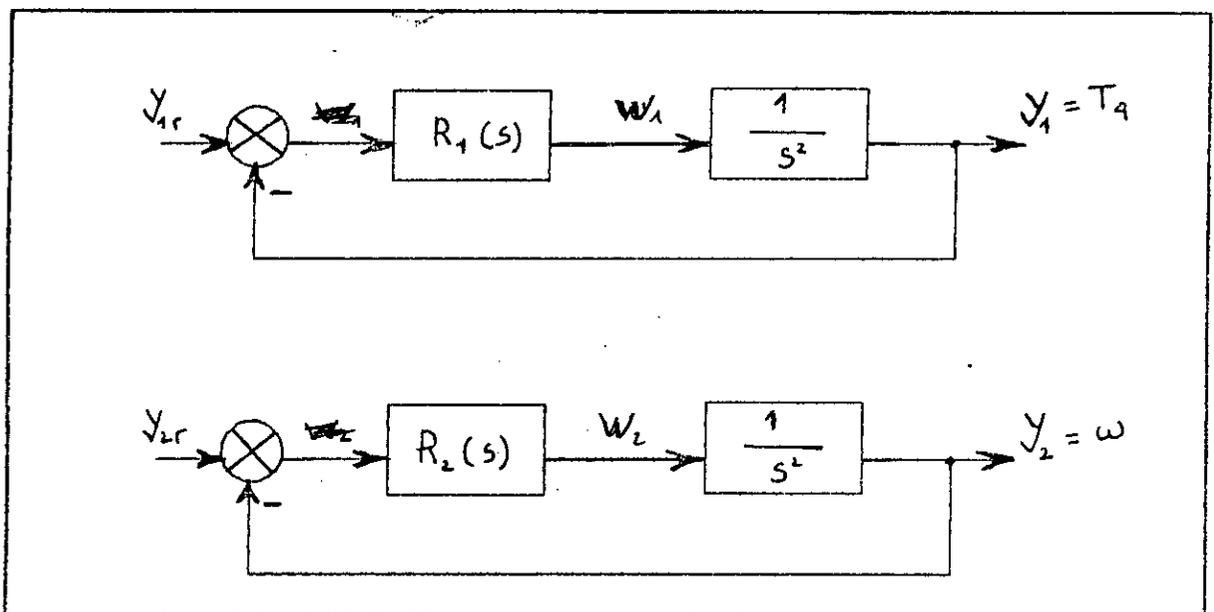
La technique de la commande classique met en évidence plusieurs types de régulateurs à savoir : P, PI et PID. Lors des simulations, le PID est le régulateur qui a donné satisfaction du point de vue stabilité.

V.3.1) Structure de la commande

Nous avons adopté pour la commande des deux sous-systèmes, un régulateur PID. Le système en boucle fermée est donnée par la fig(5.2). Son équation caractéristique s'écrit comme suit:

$$P(s) = s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i$$

où les K_i sont les paramètres réglables du régulateur.



Fig(5.2): Commande par régulateur classique.

Les fonctions de transfert des régulateurs $R_1(s)$ s'écrivent de la manière suivante:

$$R_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

V.3.2) Résultats de la simulation et commentaires:

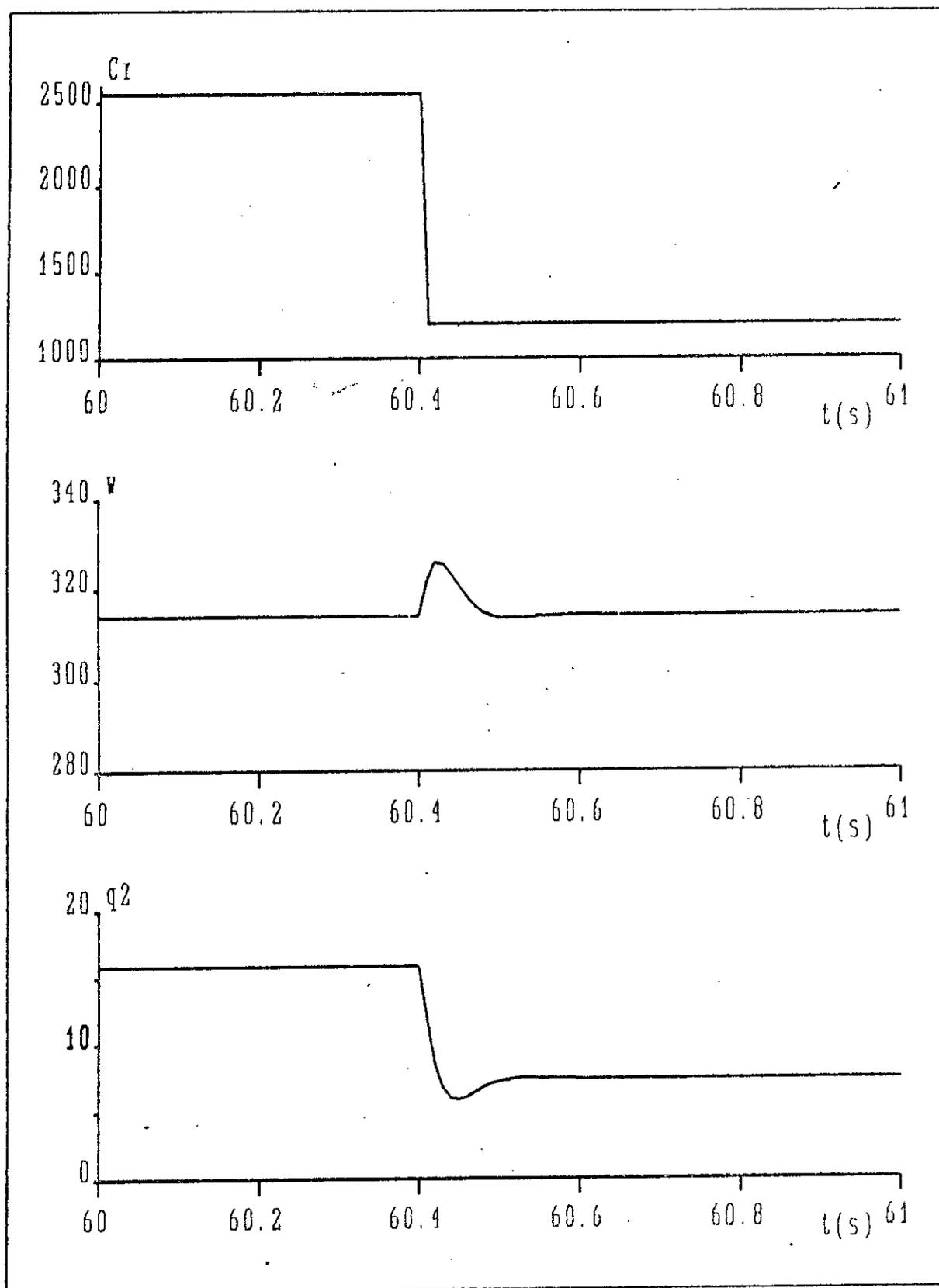
Dans les mêmes conditions que précédemment, on a simulé le système par la commande classique en utilisant un régulateur PID.

Ce dernier a permis de stabiliser le système et de rejeter les perturbations fig(5.3b), fig(5.4b) et fig(5.5b). La dynamique désirée est imposée en faisant le choix approprié des paramètres du régulateur.

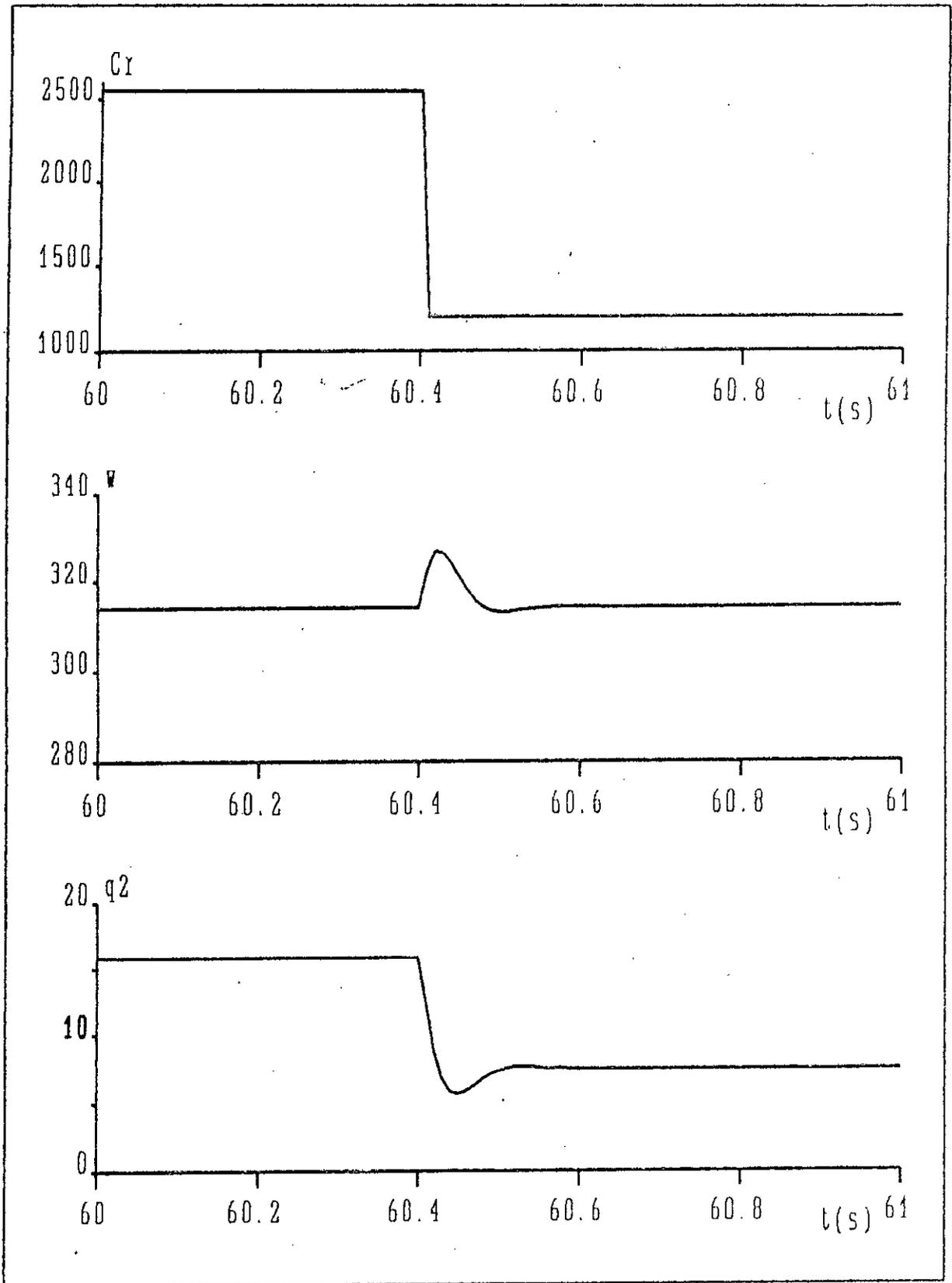
V.4) Conclusion

La simulation a donc validé la commande linéarisante, synthétisée par bouclage dynamique. En effet les sous-systèmes S1 et S2 sont parfaitement linéaires et découplés, et ainsi, nous avons pu réguler les deux sous systèmes indépendamment.

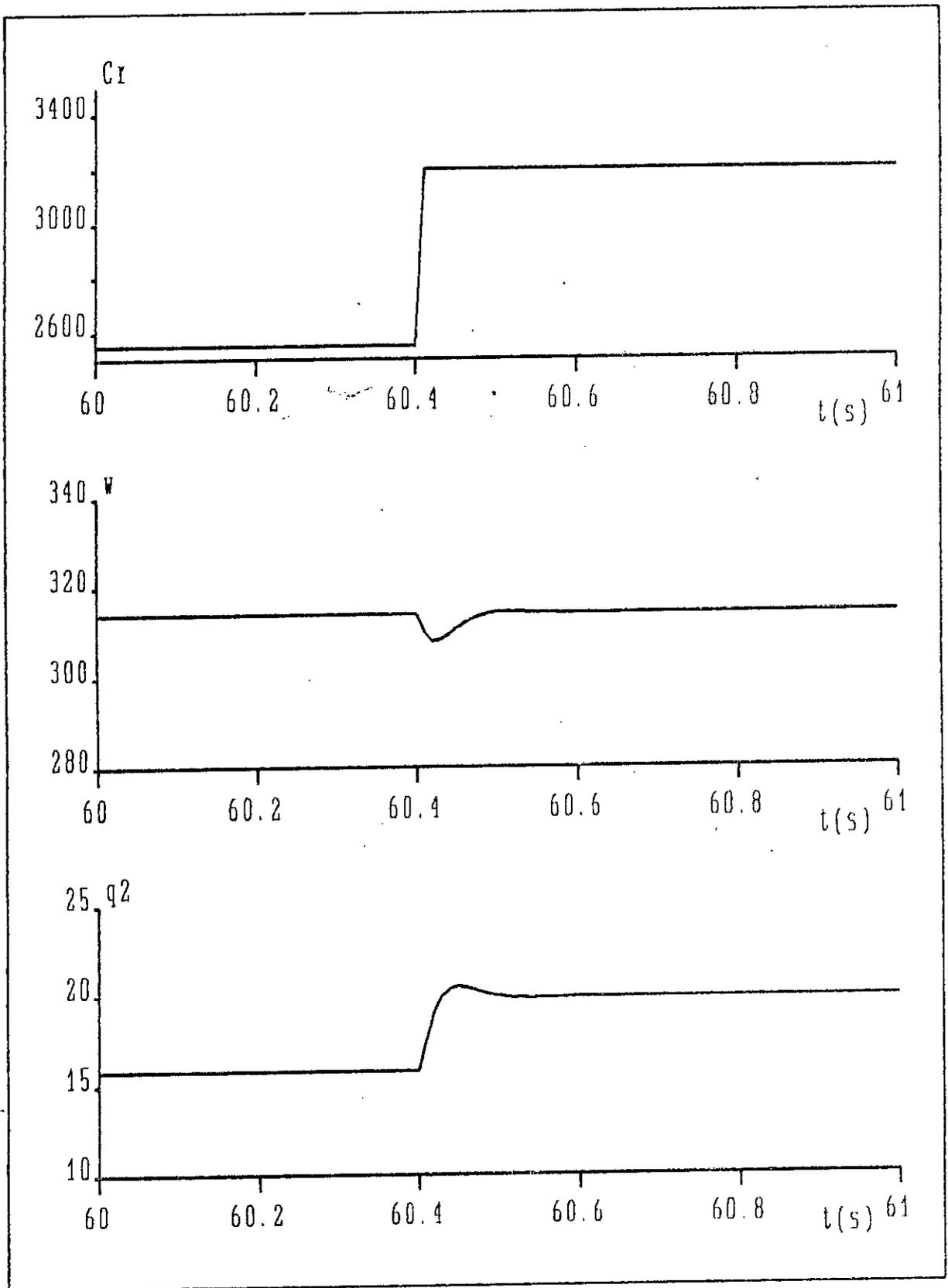
Le réglage par retour d'état, tout comme le réglage classique nous a permis d'atteindre les objectifs fixés, à savoir, l'annulation des perturbations et la stabilisation des grandeurs de sorties du système. Il nous est apparu au cours des simulations, que la dynamique des réponses du système en présence des perturbations est plus facilement maîtrisable par retour d'état que par réglage classique.



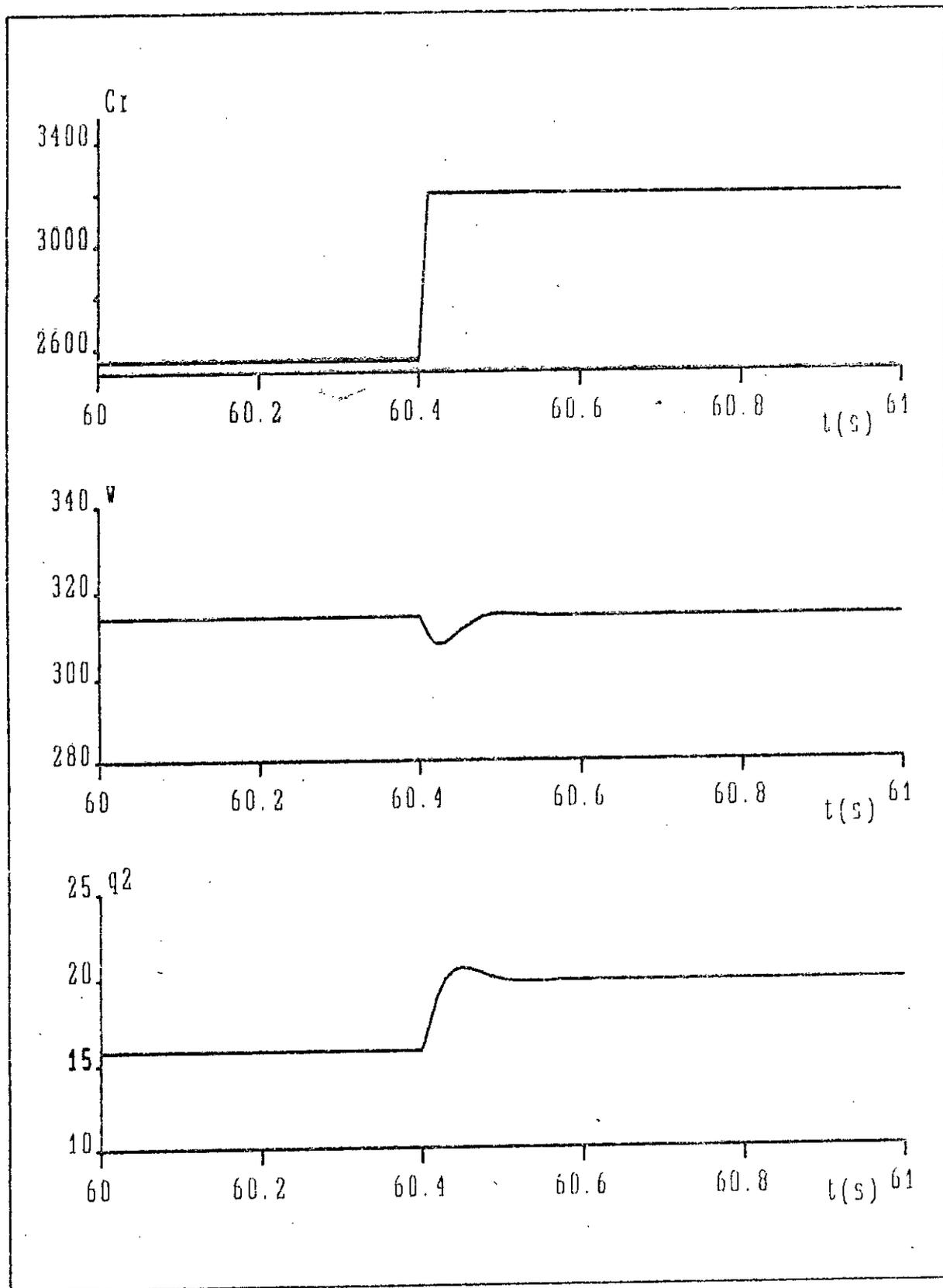
Fig(5.3a): Régulation de w par R.E avec délèstage de 50%



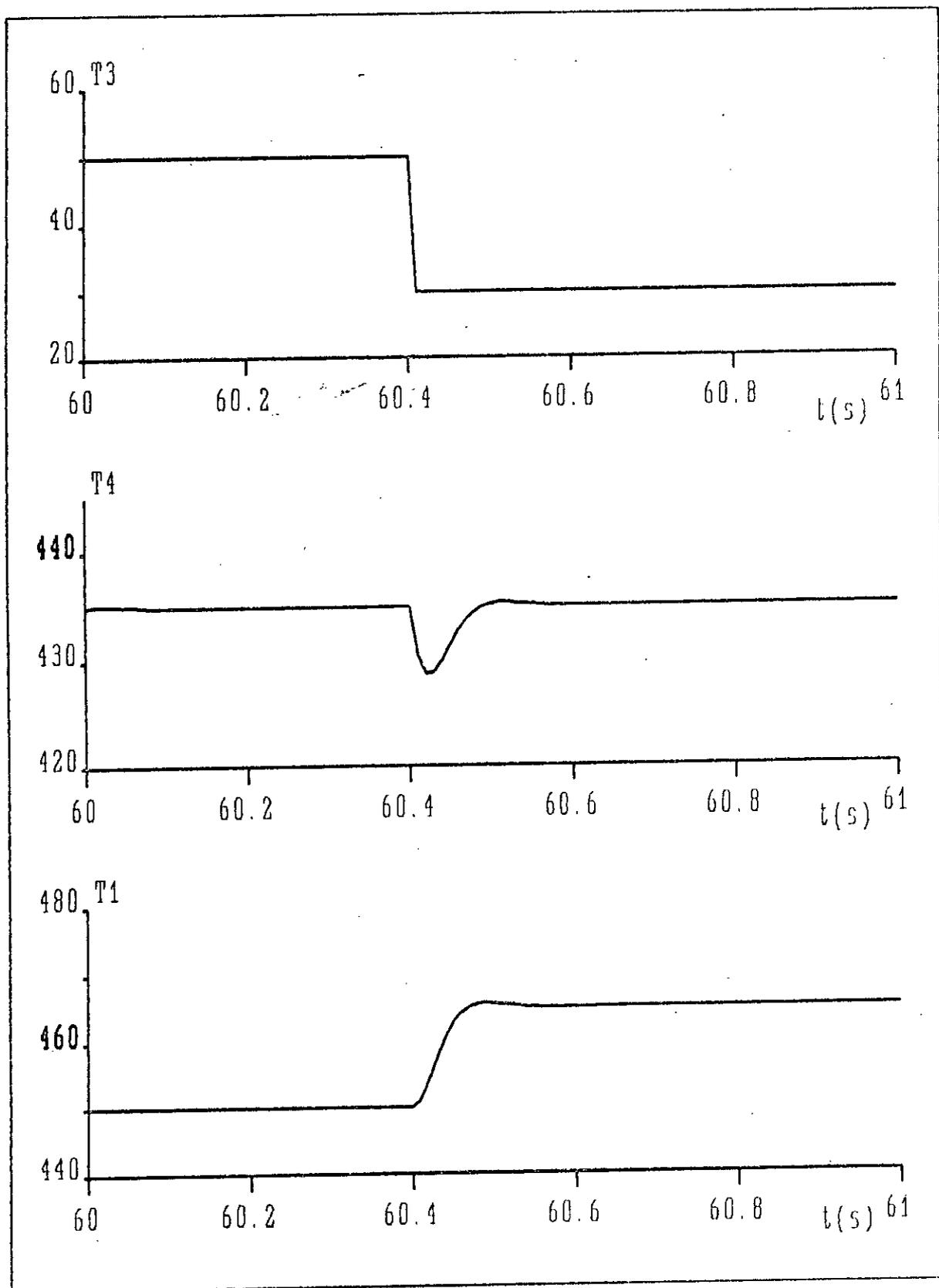
Fig(5.3b): Régulation de w par PID avec délèstage de 50%



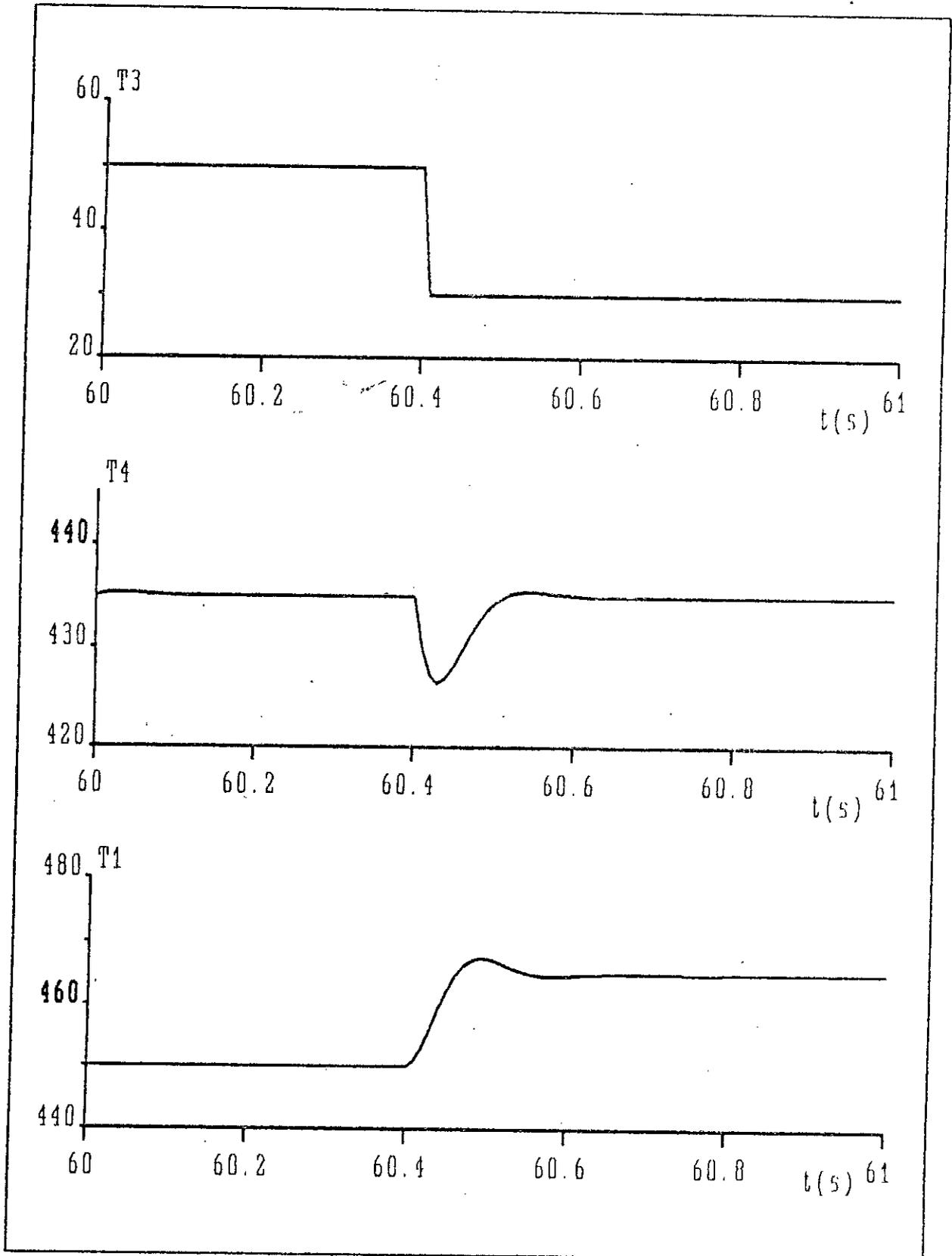
Fig(5.4a): Régulation de w par R.E avec surcharge de 25%



Fig(5.4b): Régulation de w par un PID avec surcharge de 25%



Fig(5.5a): Régulation de $T4$ par R.E avec perturbation.



Fig(5.5b): Régulation de T4 par PID avec perturbation.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion Générale

Le but essentiel du réglage de vitesse d'un groupe, est d'adapter la puissance délivrée par la turbine à la charge, appelée aux bornes de l'alternateur, tout en maintenant constante la vitesse de rotation du groupe, donc la fréquence sur le réseau au voisinage de sa valeur nominale, compte tenu de la valeur de la consigne d'exploitation qui lui est appliquée.

Nous avons donc, après avoir modélisé, linéarisé et découplé le système, assuré le réglage approprié, la stabilité souhaitable au réseau, et limité l'amplitude des variations de fréquence consécutives aux variations de charges aux bornes du groupe.

Le modèle mathématique de notre système étant non-linéaire, couplé et multivariable (bicarré) nous avons donc en premier lieu recouru à une technique moderne mais délicate qui est la "commande linéarisante des systèmes non-linéaires". La solution proposée par cette technique est une linéarisation locale et un découplage entrées/sorties physique par un retour d'état non-linéaire.

La linéarisation n'a pu être faite que par un bouclage dynamique, et cela à cause de la singularité de la matrice de découplage. En raison du degré relatif vectoriel du système extensé, dont la somme des composantes est inférieure à l'ordre du système, une partie non observable a apparu. Cependant la dynamique des zéros est restée stable. Sur la partie linéarisée, nous avons appliqué les techniques de commande des systèmes linéaires; à savoir le retour d'état puis la commande classique. Ces commandes nous ont permis de réguler les grandeurs de sortie de notre système et de plus, leur imposer une dynamique que l'on désire.

ANNEXES

ANNEXE I

Nous donnons les valeurs numériques utilisées dans la simulation de notre modèle.

Fluide caloporteur (Hitec):

. chaleur massique	$C_{p1}=0.37$ (kcal/kg°C)
. masse volumique	$\rho_1=1551$ kg/m ³
. viscosité	$\mu_1 =1.55 \cdot 10^{-3}$ kg/ms
. vitesse d'écoulement	$v_1=3.04$ m/s
. conductivité thermique	$K_1=0.43$ kcal/hm
. débit massique nominal	$q_1=35.4$ kg/s

Fluide moteur (eau):

. chaleur massique	$C_{p2}=0.5$ kcal/kg°C
. masse volumique	$\rho_2=1551$ kg/m ³
. viscosité	$\mu_2 =1.55 \cdot 10^{-3}$ kg/ms
. vitesse d'écoulement	$v_2=3.04$ m/s
. conductivité thermique	$K_2=0.43$ kcal/hm°C
. débit massique nominal	$q_2=15.8$ kg/s

Faisceau tubulaire (acier):

$C_{pm}=0.11$ kcal/kg°C $\rho=1000$ kg/m³ $K_m=16-19$ kcal/hm°C (300-500°C)

coefficients d'échanges : donnés par la relation de Nusselt

$Nu = hd/K = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.33}$ où: $Pe=d v \rho / \mu$ et $Pr=C_p \mu / K$

d: diamètre intérieur des tubes, soit d= 20 mm

A.N: $h_{r1m} = 1166.25$ kcal/h.m²°C = 0.02 kcal/s.m²°C

$h_{mr2} = 350.12$ kcal/h.m²°C = 0.05 kcal/s.m²°C

Surface d'échange: $S= 2500$ m²

masses: Hitec (5000 kg) Eau (3000 kg) acier (9000 kg)

ANNEXE II

Coefficients des paramètres du système d'équation d'état

(chap. II § 4)

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{2CP_1Q_1 + h_{f1}MS}{m_{f1}CP_1} ; & a_2 &= \frac{2CP_1Q_1 - h_{f1}MS}{m_{f1}CP_1} ; & a_3 &= \frac{2h_{f1}MS}{m_{f1}CP_1} \\
 b_1 &= \frac{2CP_2T_3}{m_{f2}CP_2} , & b_2 &= \frac{h_{Mf2}S}{m_{f2}CP_2} ; & b_4 &= \frac{2CP_2}{m_{f2}CP_2} ; & b_5 &= \frac{h_{Mf2}ST_3}{m_{f2}CP_2} \\
 c_1 &= \frac{h_{f1}MS}{2m_HCP_H} , & c_2 &= \frac{h_{Mf2}S}{2m_HCP_H} ; & c_3 &= \frac{(h_{f1}MS + h_{Mf2}S)}{m_HCP_H} ; & c_4 &= \frac{h_f}{Z_1} \\
 K &= \frac{P_n}{JQ_{2n}} ; & \Gamma &= \frac{P_n}{J\omega_n}
 \end{aligned}$$

Valeurs numériques:

a ₁ =0.0412	b ₁ =0.033	c ₁ =0.025	K=50635.9
a ₂ =-0.013	b ₂ =0.083	c ₂ =0.063	Γ=2547.8
a ₃ =0.054	b ₃ =0.167	c ₃ =0.176	
	b ₄ =6.7 10	c ₄ =3.156	

BIBLIOGRAPHIE

I. Ouvrages

- [1] A. Isidori, "Nonlinear control systems", An introduction, communications and control engineering series, 2nd edition, Springer Verlag, 1989.
- [2] H. Buhler, "Conception de systemes automatiques", PPR, Lausanne (Suisse), 1988.
- [3] L. Maret, "régulation automatique", PPR, Lausanne (Suisse), 1987.
- [4] B.C. Kuo, "Automatic control systems", 6th ed englewood cliffs prentice-hall, 1991.
- [5] M. Rivoire, J.L. Ferrier, "Cour d'automatique: tome 2, régulation", Eyrolles, Paris, 1990.
- [6] G. Klefenz, "La regulation dans les centrales thermiques", trad de la 2ed allemande par C. Metayer, Eyrolles, Paris, 1974
- [7] F. Kreith, "Transmission de la chaleur et thermodynamique", Paris, Masson, 1967.
- [8] Van Willen, "thermodynamique appliquée"
- [9] W. Palz, "L'électricité solaire", Dunod, UNESCO, 1981.

II. Thèses

- [10] S. Brahim Belhouari, D. Yahia Meddah, "commandé linéarisante des systèmes non linéaires", PFE, ENP d'Alger, 1993.
- [11] J. Mignot, "Modélisation, identification et commande adaptative d'un module de conversion héliothermique de type Thek", Thèse 3 cycle, Automatique, Toulouse, 1983.

[12] J.Combes, "Analyse comparative de centrales électrosolaires",
Thèse de docteur ingénieur (Energétique), ECDAM, 1983.

III. Articles

[13] M.Djemai, "Sur les systemes non linéaire: Approche de la
linéarisation par bouclage", Lab. des sign. et syst, CNRS-
SUPELEC, 1991/1992.

[14] International seminar, "Automatique control in production and
distribution of electrical power", PAEB, Dunod, Paris, 1967.

IV. Revues

[15] C.N.R.S, "Entropie", N°103, 1982.

[16] I.S.E.S, "Solar Energy", Volume 26, Number 4, 1981.

[17] C.N.R.S, "Revue de L'ENERGIE", N°313, Mars 1979.