

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

École Nationale Polytechnique  
Laboratoire de Commande des Processus



Département d'automatique

*Projet de fin d'étude*

Pour l'obtention du diplôme

*D'ingénieur d'État en Automatique*

**THÈME**

**COMMANDE ET ESTIMATION ROBUSTES  
D'UNE STATION SOLAIRE THERMIQUE**

**Travail réalisé par :**

BOUDJEDIR Chemss eddine

&

FENCHOUCHE Zakaria

**Proposée et dirigé :**

Pr. M.Tadjine

&

Pr. M.S.Boucherit

JUIN 2015

## REMERCIEMENTS

*Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs Monsieur M.Tadjine et Monsieur M.S.Bouchrit pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseillé tout au long de ce travail ainsi pour la confiance qu'ils nous ont accordée.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre projet.*

*Nous souhaitons aussi remercier Nos professeurs d'Automatique et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude (MOSBAH Charaf Abd El karim).*

*DÉDICACES*

À

*Ma mère*

*Ma mère*

*Ma mère*

*Mon père*

## Résumé :

Le but de cette étude est la contribution dans le développement des projets qui aident à construire une économie basée non seulement sur les carburants mais sur les énergies renouvelables, la station solaire thermique est l'une des nouvelles solutions, on travaille sur celle de capteur cylindro-parabolique, on modélise et on simule le système via l'application des commandes robustes : mode glissant et  $H_{\infty}$  pour réduire l'effet des perturbations extérieurs et des différentes erreurs de modélisation, à cause de ces différentes sources de perturbations (changements des radiations, poussière sur les collecteurs, influence des nuages ), on applique l'observateur à grande gains pour estimer les températures du fluide, une analyse de convergence globale a été faite, suivie par une validation par simulation.

**Mots clés :** Station solaire thermique, commande robuste, mode glissant,  $H_{\infty}$ , observateur à grande gains, système incertain.

---

## Abstract :

The purpose of this study is to make a contribution in the developpement of projects seeking for enhancing an economy based, not only on fuel, but also on renewable enrgies. The solar thermal station is one of several new solutions. Our work is related to cylindro-parabolic sensors, we made a model and we simulated the system via the application of robust controls : sliding mode and  $H_{\infty}$  in order to reduce the effects of external disturbances and several modelisation errors. Due to these distrubance sources ( radiations changes, dust on the collectors, influence of cloud...) we applied a high gain observor, to estimate the fluid tempertaures, an analyse of convergence was done, followed by a validation by simulation.

**Key words :** Solar thermique station, robust control, sliding mode,  $H_{\infty}$ , high gain estimator, incertain system.

تهدف هذه الدراسة الى المساهمة في تنمية المشاريع التي تساعد على بناء اقتصاد وطني لا يعتمد بشكل كلي على المحروقات وإنما على الطاقات المتجددة حيث تعتبر المحطات الشمسية الحرارية احدى الحلول الحديثة. إذ قمنا بمحاكاة تحكم للمحطات ذات مكثفات الأشعة الشمسية شكل المقعر الأسطواني عن طريق التحكمات المتينة  $H_{\infty}$  و النمط الانزلاقي من أجل خفض تأثير التشويش الخارجي و مختلف أخطاء التصميم، و بسبب هذه الأخطاء ( تغير قوة أشعة الشمس، تراكم الغبار على المكثفات، تأثير السحاب ) قمنا بتطبيق مراقبات الحالة أجل تقدير درجات الحرارة الخاصة بالمائع، وقمنا كذلك بدراسة تحليلية ثبنا من خلالها التقارب الإجمالي لهذه المراقبات ثم أخيرا أثبتنا صحة الدراسة عن طريق المحاكات.

الكلمات المفتاحية : محطة شمسية حرارية التحكم المتين تحكم النمط الانزلاقي تحكم ( $H_{\infty}$ ).

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>xi</b>
<b>2</b>	<b>Description et Modélisation d'une station solaire thermique</b>	<b>3</b>
2.1	Introduction	3
2.2	Principe du solaire thermique	4
2.3	Types des centrales solaires thermiques	6
2.3.1	Centrales à capteurs cylindro-paraboliques	6
2.3.2	Centrales solaires à effet de cheminée	7
2.3.3	Centrales à tour	8
2.3.4	Centrales à capteurs paraboliques	9
2.3.5	Centrales à réflecteurs de Fresnel	9
2.4	Fluides caloporteurs	10
2.5	Stockage thermique	10
2.5.1	En fabricant de l'hydrogène	10
2.5.2	Dans du sel fondu	11
2.6	Approches de modélisation et de simulation des systèmes solaires thermiques	11
2.6.1	Modèle fondamentale	11
2.6.2	Modèle à paramètres regroupés	12
2.6.3	Modèle bilinéaire	12
2.6.4	Modèle de résonance	13
2.6.5	Modèle empirique	13
2.7	Modélisation du système	14
2.7.1	Bilan énergétique	14
2.7.2	Représentation d'état	15
2.8	Simulation avec régulateur PID	18
2.9	Conclusion	18
<b>3</b>	<b>Commande par <math>H_\infty</math></b>	<b>20</b>
3.1	Introduction	20
3.2	Modélisation d'un système incertain	20
3.2.1	Erreur de modélisation	20
3.2.2	Principe de la commande $H_\infty$	21
3.2.3	Forme standard de la commande $H_\infty$	24
3.3	développement de la commande sur le système	24
3.3.1	Choix des pondérations	26
3.3.2	Calcul de la commande	26
3.4	Simulation	28
3.4.1	Système parfait	28
3.4.2	Système incertain	28
3.5	Tests de robustesse	29
3.6	Conclusion	30

<b>4</b>	<b>Commande par mode glissant</b>	<b>32</b>
4.1	Introduction	32
4.2	Notion commande par mode glissant	32
4.3	Conception de la commande par mode glissant	33
4.3.1	Choix de la surface de glissement.	33
4.3.2	Établissement des conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement	33
4.3.3	Établissement de la loi de commande	34
4.3.4	Phénomène de Chattering	35
4.4	Développement de la commande sur le collecteur cylindro-parabolique	35
4.4.1	Choix de la surface de glissement	35
4.4.2	Conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement	36
4.4.3	Établissement de la loi de commande	36
4.5	Simulation	37
4.5.1	Système incertain	37
4.5.2	Système parfait	38
4.6	Tests de robustesse	39
4.6.1	Système incertain	39
4.6.2	Système parfait	40
4.7	Conclusion	40
<b>5</b>	<b>Estimation des températures par l'observateur à grand gains</b>	<b>43</b>
5.1	Introduction	43
5.2	Les observateurs d'état	43
5.2.1	Observateur linéaire	44
5.2.2	Observateur non linéaire	44
5.2.3	Définitions théoriques	45
5.3	Types d'observateur non linéaire	45
5.3.1	Filtre de Kalman Étendu (EKF)	45
5.3.2	Observateurs à mode glissant	46
5.3.3	Observateur de Luenberger étendu	46
5.3.4	Observateur à grand gains	46
5.4	Observation station solaire	47
5.5	Observateur à grand gain pour les systèmes non linéaire	47
5.5.1	Synthèse d'observateur	47
5.5.2	Hypothèses de synthèse	48
5.5.3	Vérification des hypothèses sur notre système :	48
5.5.4	Synthèse de convergence globale ( observateur / commande )	50
5.6	Simulation	54
5.6.1	Système incertain	54
5.6.2	Système parfait	55
5.7	Tests de robustesse	57
5.8	Conclusion	57
<b>6</b>	<b>Estimation des températures par mode de glissement</b>	<b>59</b>
6.1	Introduction	59
6.2	Observateur classique par modes glissants	59
6.2.1	Observateur triangulaire par modes glissants	60
6.3	Application de l'observateur à mode de glissement	61
6.3.1	Condition d'attractivité	61
6.3.2	Surface de glissement	62
6.4	Résultats de simulation	63
6.4.1	Système incertain	63

6.4.2	Système parfait . . . . .	65
6.5	Conclusion . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>Bibliography</b>	<b>69</b>

# Table des figures

2.1	distribution de l'énergie solaire dans le monde . . . . .	3
2.2	Les différents types de concentration des rayonnements solaires . . . . .	4
2.3	Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique . . . . .	4
2.4	Comparaison des technologies solaires à concentration . . . . .	5
2.5	Les types des centrales solaires . . . . .	6
2.6	Concentrateur Cylindro-parabolique . . . . .	6
2.7	Centrale à capteurs cylindro-paraboliques . . . . .	6
2.8	Centrale solaire à effet de cheminée . . . . .	7
2.9	Principe de fonctionnement d'une centrale à effet de cheminée . . . . .	7
2.10	Centrale à tour . . . . .	8
2.11	Principe de fonctionnement d'une centrale à tour . . . . .	8
2.12	Centrale à capteur parabolique . . . . .	9
2.13	Capteur parabolique . . . . .	9
2.14	reflecteur de Fresnel . . . . .	10
2.15	Principe d'utilisation du fluide caloporteur . . . . .	10
2.16	schéma de principe du circuit d'huile . . . . .	14
2.17	schéma de principe du circuit d'huile . . . . .	15
2.18	Résultat de la poursuite de référence . . . . .	18
2.19	La variation de commande . . . . .	18
2.20	L'irradiation solaire . . . . .	18
3.1	Les différents types de représentation des erreurs de modélisation . . . . .	21
3.2	Théorème des petits gains : stabilité robuste . . . . .	21
3.3	Configuration d'une perturbation additive . . . . .	22
3.4	La forme standard de la commande $H_\infty$ . . . . .	24
3.5	mise sous forme standard . . . . .	25
3.6	Organigramme traçant les étapes d'application de la commande $H_\infty$ . . . . .	25
3.7	la poursuite de référence . . . . .	28
3.8	La variation de la commande . . . . .	28
3.9	Les valeurs singuliers de $T(s)$ et $1/W_2$ . . . . .	28
3.10	Les valeurs singuliers de $S(s)$ et $1/W_1$ . . . . .	28
3.11	la poursuite de référence . . . . .	28
3.12	La variation de la commande . . . . .	28
3.13	résultats avec la variation des paramètres du fluide pour le système incertain . . . . .	29
3.14	résultats avec la variation des paramètres du fluide pour le système parfait . . . . .	30
4.1	Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement . . . . .	34
4.2	Principe de la commande par mode glissant . . . . .	35
4.3	La fonction de saturation . . . . .	35
4.4	Résultat de la poursuite de référence . . . . .	37
4.5	La variation de commande . . . . .	37
4.6	L'irradiation solaire . . . . .	37

4.7	Résultat de la poursuite de référence . . . . .	38
4.8	La variation de commande . . . . .	38
4.9	L'irradiation solaire . . . . .	38
4.10	résultats avec la variation de $H_t$ et $\rho_f$ . . . . .	39
4.11	résultats avec la variation de $H_t$ et $C_f$ . . . . .	39
4.12	résultats avec la variation des quatre paramètres du fluide . . . . .	39
4.13	résultats avec la variation de $H_t$ et $\rho_f$ . . . . .	40
4.14	résultats avec la variation de $H_t$ et $C_f$ . . . . .	40
4.15	résultats avec la variation des paramètres du fluide . . . . .	40
5.1	Résultats de la poursuite de référence . . . . .	54
5.2	L'erreur d'estimation sur la sortie . . . . .	54
5.3	La variation de commande . . . . .	54
5.4	L'irradiation solaire . . . . .	54
5.5	Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états . . . . .	54
5.6	La variation de la température au cours du tube . . . . .	55
5.7	L'erreur d'observation au cours du tube . . . . .	55
5.8	Résultats de la poursuite de référence . . . . .	55
5.9	L'erreur d'estimation sur la sortie . . . . .	55
5.10	La variation de commande . . . . .	56
5.11	Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états . . . . .	56
5.12	La variation de la température au cours du tube . . . . .	56
5.13	L'erreur d'observation au cours du tube . . . . .	56
5.14	résultats avec la variation des quatre paramètres du fluide pour le système incertain . . . . .	57
6.1	Résultat de la poursuite de référence . . . . .	63
6.2	Zoom 1 sur la réponse . . . . .	63
6.3	Zoom 2 sur la réponse . . . . .	63
6.4	La variation de commande . . . . .	63
6.5	L'irradiation solaire . . . . .	63
6.6	l'erreur d'estimation à la sortie . . . . .	64
6.7	Zoom sur l'erreur d'estimation à la sortie . . . . .	64
6.8	Les 8 premiers erreurs d'estimations . . . . .	64
6.9	Résultat de la poursuite de référence . . . . .	65
6.10	La variation de commande . . . . .	65
6.11	l'erreur d'estimation à la sortie . . . . .	65
6.12	Zoom 1 sur l'erreur d'estimation . . . . .	65
6.13	Les 8 premiers erreurs d'estimations . . . . .	65

# Nomenclature et abréviation

paramètre	Description	Unité
$t$	Temps	s
$l$	Longueur	m
$\rho$	Densité	kg/m <sup>3</sup>
$C$	Capacité thermique spécifique	J/(kg K)
$A$	Section transversale	m <sup>2</sup>
$T(l, t)$	Température	K
$q(t)$	Débit du fluide	m <sup>3</sup> /s
$I(t)$	Rayonnement solaire	W/m <sup>2</sup>
$\eta_0$	Efficacité géométrique	-
$K_{opt}$	Efficacité optique	-
$G$	Ouverture du collecteur	m
$T_a(t)$	Température ambiante	K
$H_l$	Coefficient global des pertes thermique	W/(K m <sup>2</sup> )
$H_t$	Coefficient de transmission thermique de métal-fluide	W/(K m <sup>2</sup> )
$\delta_p$	périmètre mouillé	m
$C$	Facteur de concentration	
$\xi$	Erreur de discrétisation	
$z$	Quantificateur de performance	
$W$	Pondération	
$y_r$	Consigne	
$e(x)$	Erreur de poursuite	
$r$	Degré relatif	
$S_\varphi$	Surface de glissement	
$V(x)$	Fonction de Lyapounov	
$\varepsilon$	Paramètre de réglage	
$\lambda_{max,min}$	Valeurs propres	
$L_i$	Gains de l'observateur	

### Abreviation

EDP	Équation différentielle partielle
EKF	Filtre de Kalman étendu
HTF	Transfert de chaleur du fluide
LMI	Linear matrice intégral
NL	Non linear système
PID	Proportionnel intégral dérivée

# Introduction générale

Dans notre vie, l'énergie fossile reste la principale source de production d'électricité, mais elle risque de disparaître dans les années à venir, comme elle a d'autres inconvénients tels que, les émissions de  $\text{CO}_2$ , et la dépendance de l'économie de l'état sur cette matière. Pour cela, on veut construire une économie basée non seulement sur des carburants, mais aussi sur les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire. Le gisement solaire est une source d'énergie disponible en grande quantité, en tout point de la surface terrestre et à exploiter gratuitement, alors l'implémentation des stations solaires thermiques est l'une des solutions récentes dans l'industrie qui utilise cette énergie grâce à son rendement élevé par rapport aux autres techniques.

La différence principale entre une centrale traditionnelle (qui fonctionne en utilisant des carburants...) et une station solaire, c'est que la source d'énergie primaire et principale qui est le rayonnement solaire n'est pas contrôlable, contrairement aux carburants. encore, on a des changements d'efficacité globale en raison de l'accumulation de la poussière sur les collecteurs, aussi, des changements dans la température à l'entrée... etc, ce qui génère une difficulté pour obtenir les objectifs désirées. C'est là où l'automatique trouve sa place, prenant la commande de débit, comme la plus efficace solution pour compenser ces variations.

Notre mémoire présente dans un premier temps, le principe du solaire thermique, avec les différents types des stations existant dans l'industrie, puis nous nous sommes focalisé sur les stations solaires basées sur des collecteurs cylindro-paraboliques, nous avons donné un modèle de connaissance de ce système suivie par une modélisation dans l'espace d'état, prenant en compte les erreurs de modélisation et de troncature.

Dans le deuxième chapitre, on entame la partie commande par la première commande robuste " $H_\infty$ ", expliquant son utilité, et donnant l'idée générale et les étapes de synthèses, suivie par des simulations et des tests de robustesse.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter la deuxième commande robuste " par mode de glissement ". En commençant par donner sa notion avec les étapes d'application, ensuite, on va l'appliquer sur notre système, le développement fait, va être validé par des simulations avec des tests de robustesse .

Dans le quatrième chapitre, nous introduisons l'observateur à grand gains sur le système qui prend en compte la non-stationnarité et la non-linéarité des procédés industriels, nous donnons et vérifions ces différentes conditions, ensuite nous appliquons la commande par mode glissant synthétisée via cet observateur en faisant une démonstration de convergence globale d'erreur d'estimation et d'erreur de poursuite.

On termine dans le cinquième chapitre la partie estimation par l'observateur par mode glissant, en donnant une petite introduction à la méthode, suivie par l'application sur notre système, finalement, des simulations sont données à la fin du travail.

# Chapitre I

---

Description et Modélisation

d'une Station solaire

thermique

## Chapitre 2

# Description et Modélisation d'une station solaire thermique

### 2.1 Introduction

Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers [34] .

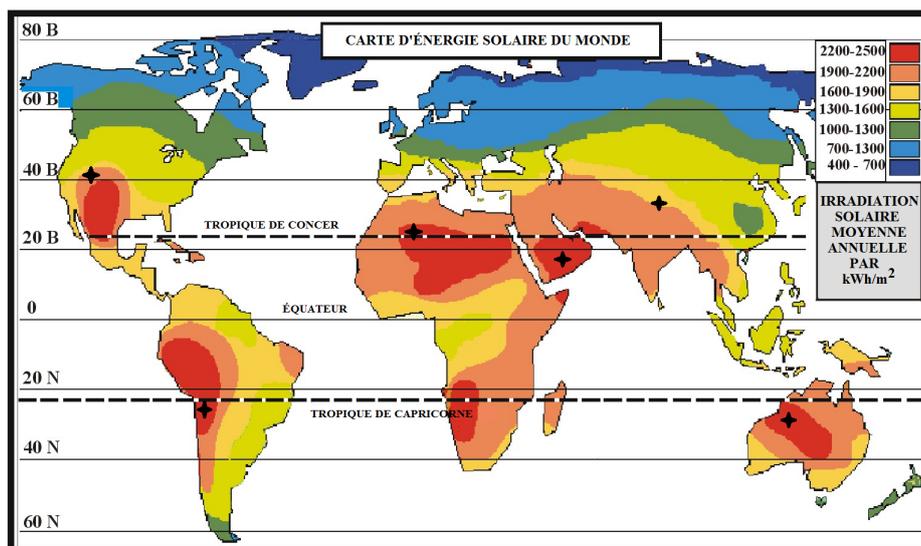


FIGURE 2.1 – distribution de l'énergie solaire dans le monde.

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaires. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration, plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

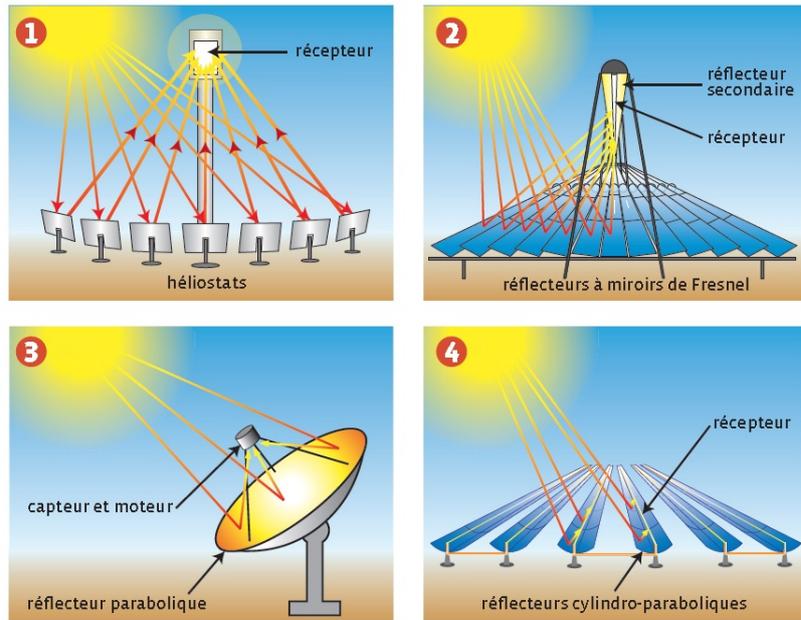


FIGURE 2.2 – Les différents types de concentration des rayonnements solaires

## 2.2 Principe du solaire thermique

Le principe du solaire thermique est de produire des températures exploitables pour les dispositifs thermodynamique de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique [27] .

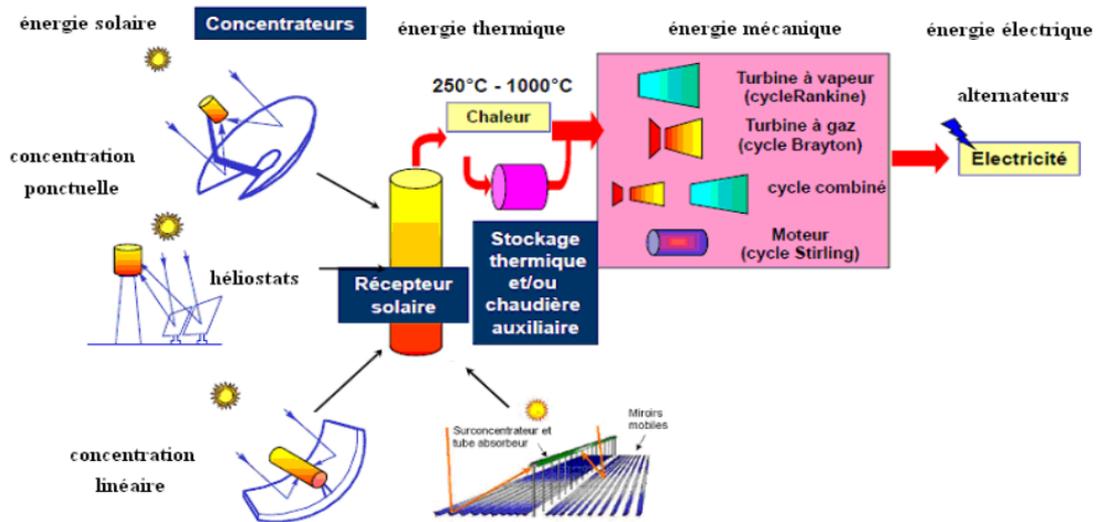


FIGURE 2.3 – Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique

Mais quelle que soit la solution technologique retenue pour la captation des flux solaires ou la transformation de chaleur en électricité, on distingue les blocs fonctionnels interagissant entre eux par le choix du fluide thermodynamique :

- 1- La collecte et la concentration par le capteur du flux solaire sur le récepteur pour chauffer le fluide caloporteur.
- 2 - Absorption sur les parois du récepteur, transformation en chaleur (production de chaleur).
- 3 - transport et éventuellement stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide caloporteur selon la température de source chaude et le système utilisé).

4 - La conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique.

Le capteur solaire ou collecteur est le composant de base du champ solaire. Il est composé d'un réflecteur (miroir), d'une structure métallique, d'un récepteur et d'un système de poursuite solaire.

Un réflecteur (miroir) est composé de verre pauvre en fer. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection.

Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97 % du rayonnement incident. La fonction du récepteur est d'absorber l'énergie solaire concentrée, de transférer la chaleur vers le fluide de transfert et de limiter les pertes thermiques (rayonnement et convection).

L'intensité de la concentration du collecteur est définie par le facteur (ou taux) de concentration (géométrique)  $C$ .

Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte au récepteur (foyer) sera importante.

$$C = \frac{\text{Surface de reflecteur}}{\text{surface de recepteur}} = \frac{S_{rf}}{S_r} = \text{Concentration}$$

Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.

Ces dispositifs se distinguent par leurs dimensions élémentaires, donc leur puissance, leurs performances optiques (concentration) et thermiques (température) ( fig 2.4 ) :

Parmi les dispositifs optiques existants pour la concentration des rayons du soleil, nous ne considérons ici que ceux retenus à une mise en œuvre industrielle pour des puissances moyennes ou fortes et qui conduisent à la production de chaleur à une température supérieure à 250 C°.

Ainsi, c'est généralement des surfaces réfléchissantes constituées de miroirs qui sont utilisés. La nature géométrique des surfaces et la complexité des structures supportant les miroirs définissent les systèmes concentrateurs.

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire se distinguent par leurs dimensions élémentaires, (donc leur puissance) et par leurs performances optiques (concentration) et thermiques (température).

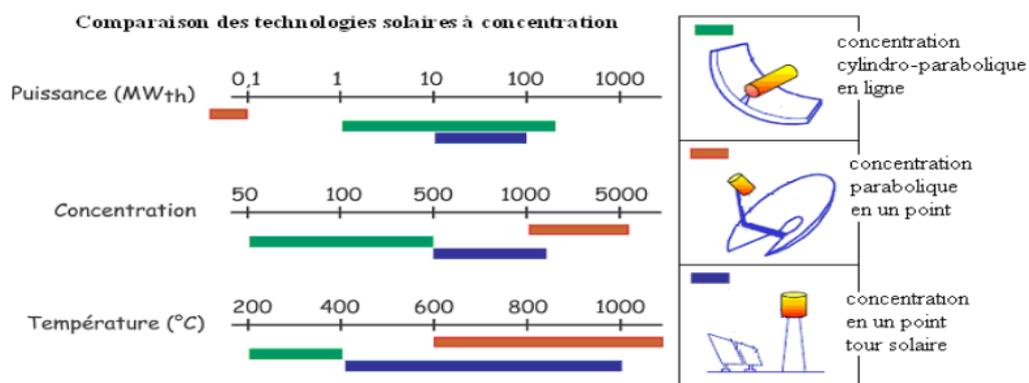


FIGURE 2.4 – Comparaison des technologies solaires à concentration

## 2.3 Types des centrales solaires thermiques

Il y a quatre grandes familles de technologie de concentration solaire. Les centrales cylindro-paraboliques sont les plus développées et dominant clairement le marché. Dans ce genre de systèmes, la concentration du rayonnement sur un seul foyer permet d'obtenir une haute température [8] .

On trouve ensuite les centrales à tour, équipées d'une multitude de miroirs orientables. Viennent ensuite les concentrateurs paraboliques. Ils sont plus adaptés à des installations décentralisées qu'à des centrales de grande puissance. Finalement, il y a les centrales à réflecteurs de Fresnel.

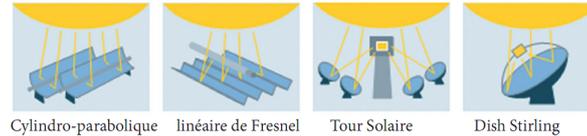


FIGURE 2.5 – Les types des centrales solaires

### 2.3.1 Centrales à capteurs cylindro-paraboliques

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80. [34]

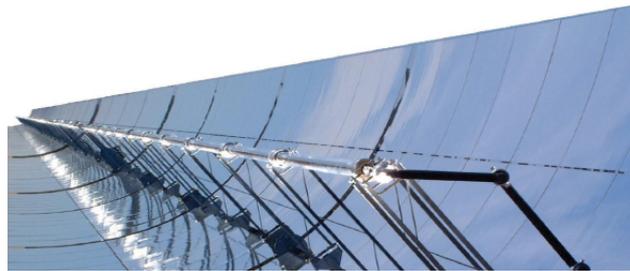


FIGURE 2.6 – Concentrateur Cylindro-parabolique

L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique.

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 400 C°. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique.

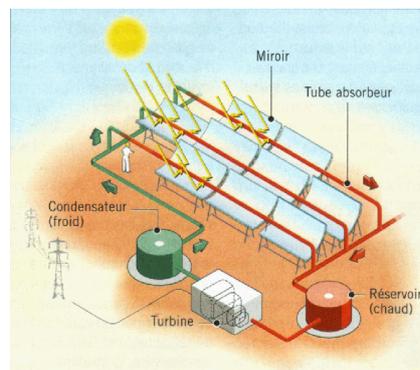


FIGURE 2.7 – Centrale à capteurs cylindro-paraboliques

### 2.3.2 Centrales solaires à effet de cheminée

Les centrales solaires à effet de cheminée sont composées d'une tour immense entourée d'une gigantesque serre. La serre est chauffée par le soleil ; l'air chaud circule jusque vers la tour, son seul point de sortie. Cet air chaud plus léger que l'air froid s'élève dans la cheminée. Ce déplacement d'air fait tourner des turbines qui produisent l'électricité. [40]



FIGURE 2.8 – Centrale solaire à effet de cheminée

#### Les avantages :

- Comme toutes les centrales vues auparavant, c'est une source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Les centrales ne polluent pas .
- Le système fonctionne jour et nuit et sans intermittence car la chaleur est toujours présente sous la serre même la nuit.
- Elles ne demandent que très peu d'entretien grâce à la simplicité du fonctionnement.

#### Les inconvénients :

- Ces centrales demandent un investissement très important.
- Etant donné l'immensité des tours, certaines personnes y voient un gâchis du paysage.

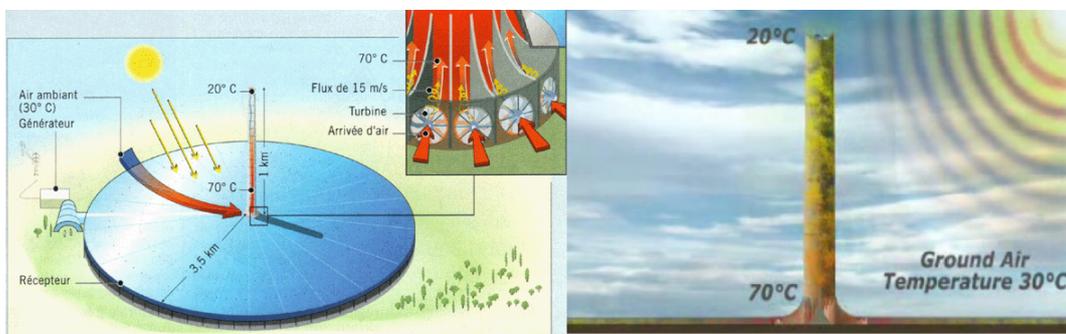


FIGURE 2.9 – Principe de fonctionnement d'un centrale à effet e cheminée

Les centrales à effet de cheminée ne sont pas encore très développées puisqu'il n'y en a actuellement qu'une seule de construite et qui ne fournit que 50kW ; des projets pour en implanter de

nouvelles, notamment en Espagne et en Australie, sont en cours. La centrale espagnole devrait faire 750 mètres de hauteur et fournir 40MW (soit la demande de 120 000 personnes en électricité) tandis que la centrale australienne devrait atteindre 1000 mètres et permettre de fabriquer 200MW."

### 2.3.3 Centrales à tour

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.



FIGURE 2.10 – Centrale à tour

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 C° à 1000 C°. [34]

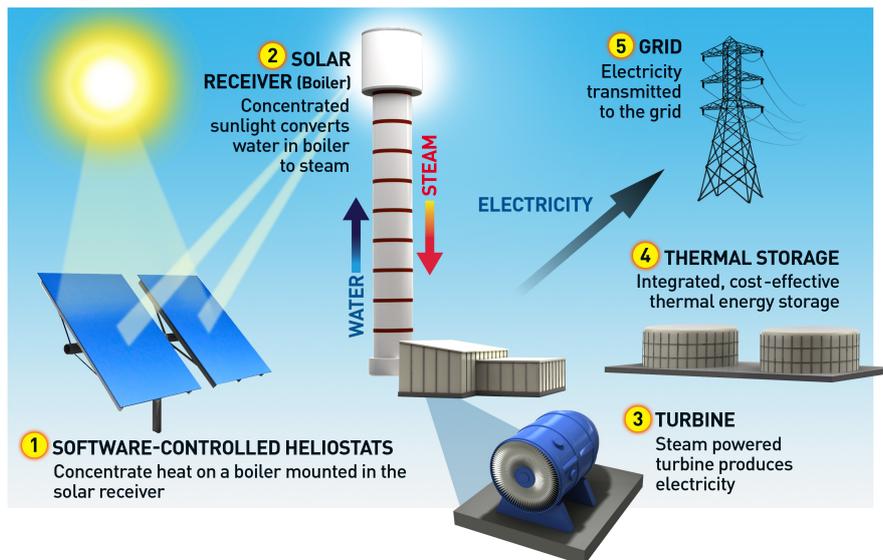


FIGURE 2.11 – Principe de fonctionnement d'une centrale à tour

### 2.3.4 Centrales à capteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750 C°.



FIGURE 2.12 – Centrale à capteur parabolique

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4 %).

Un de leur principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud. [34]

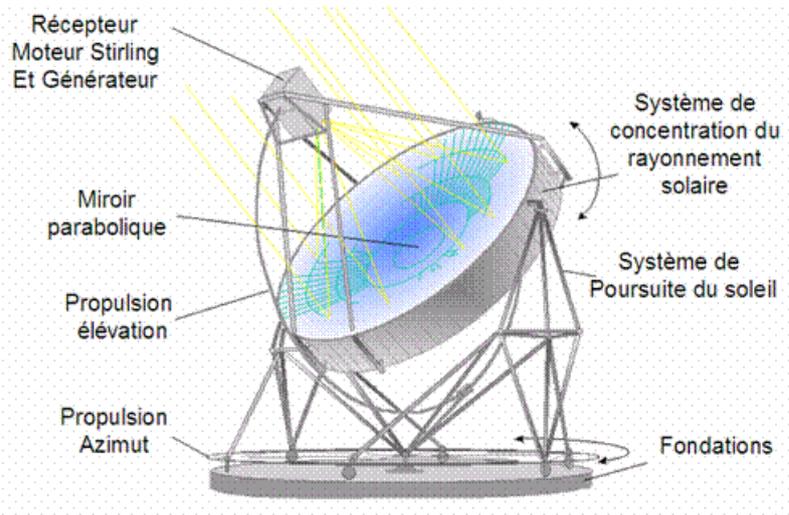


FIGURE 2.13 – Capteur parabolique

### 2.3.5 Centrales à réflecteurs de Fresnel

Il existe un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques et la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherches travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans. La figure 2.14 montre un collecteur de Fresnel. [28]

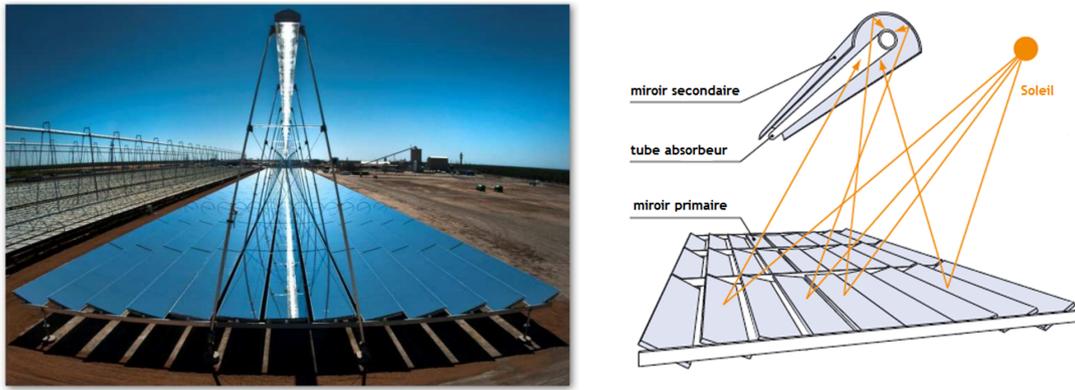


FIGURE 2.14 – réflecteur de Fresnel

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont :

- Coût inférieur des miroirs.
- Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.

## 2.4 Fluides caloporteurs

Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, impose la technologie et les matériaux du récepteur et conditionne la possibilité du stockage.

Les huiles qui présentent un bon coefficient d'échange sont les fluides les plus utilisés dans les centrales cylindro-paraboliques.

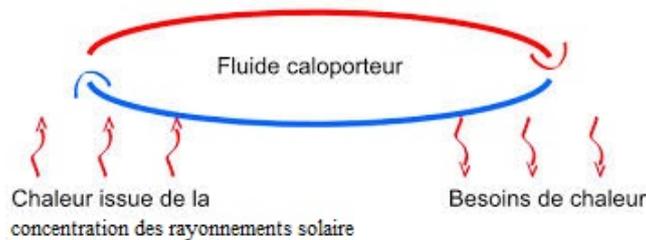


FIGURE 2.15 – Principe d'utilisation du fluide caloporteur

Les sels fondus, mélanges binaires ou ternaires à base de nitrates de sodium et de potassium qui possèdent une densité élevée sont de très bons fluides de stockage.

## 2.5 Stockage thermique

### 2.5.1 En fabricant de l'hydrogène

Avec les centrales solaires on peut envisager de produire de l'hydrogène par thermolyse de l'eau. Les molécules d'eau sont cassées à très haute température et libère des atomes d'hydrogène et d'oxygène que l'on sépare. Des systèmes à catalyseurs permettent de baisser la température de cette thermolyse.

L'hydrogène pourra remplacer à terme le gaz naturel avec comme principal risque, l'explosion. Lorsqu'il est mélangé à l'air dans des proportions comprises entre 4 et 75 % du volume, l'hydrogène est explosif et l'énergie nécessaire à l'inflammation du mélange est extrêmement basse.

Déjà une centaine de stations-service existent dans le monde notamment aux États-Unis où l'état de Californie a lancé un grand projet d'autoroute équipée de station-service à hydrogène. En mars 2005, déjà 16 stations étaient installées pour 95 véhicules. En 2010, 2000 véhicules sont prévus avec 100 stations-service. [39]

### 2.5.2 Dans du sel fondu

Pour s'affranchir de l'intermittence, le stockage de la chaleur dans du sel fondu a été choisi dans la centrale Gémasolar.

Concrètement, 2.650 héliostats, des miroirs de 110 m<sup>2</sup> qui suivent la course du soleil, répartis sur 185 hectares font converger les rayons solaires vers un réceptacle situé au sommet d'une tour de 140 mètres. Torressol annonce que 95 % de l'énergie calorifique est concentrée sur le réceptacle, qui atteint une température de 900 C°. cette chaleur est transmise aux sels fondus qui sont portés à 565 C°.

Une fois chauffé, les sels produisent, via un échangeur thermique, la vapeur qui alimente une turbine couplée à un alternateur électrique. Selon Terrasol, le recours aux sels fondus offre un premier avantage grâce à leur température très élevée qui permet de produire de la vapeur sous pression ce qui accroît le rendement.

Autre atout : avec les sels fondus, le solde de l'énergie non utilisée en journée peut être stocké dans un réservoir pour alimenter l'échangeur thermique de nuit. Quand le solaire photovoltaïque ne fonctionne que de jour, la centrale Gemasolar peut produire de l'électricité de jour comme de nuit.

Ainsi, le 4 juillet 2011, la centrale a réussi pour la première fois à produire de l'électricité pendant 24 heures sans interruption. [39]

## 2.6 Approches de modélisation et de simulation des systèmes solaires thermiques

Plusieurs classifications d'approche pour la modélisation des systèmes peuvent être trouvées dans la littérature. Les systèmes solaires thermiques peuvent être modélisés à des fins de commande, de simulation, d'optimisation, de tolérance aux défauts et autres. [28]

Les modèles de commande peuvent aller du plus simple modèle linéaire empirique jusqu'au plus complexe des modèles non linéaires de connaissance. Le modèle dépend de plusieurs paramètres, le plus important est : la forme du panneau. Dans ce qui suit nous allons présenter les modèles les plus utilisés pour décrire un panneau solaire cylindro-parabolique ainsi que ceux que nous allons utiliser dans la suite de notre travail.

### 2.6.1 Modèle fondamentale

Un système solaire thermique, sous certaines hypothèses générales peut être décrit par ce système d'équations différentielles partielles à coefficients variables suivant :

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t, l) = \eta_{col} G I(t) - P_{rc} - D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (2.1)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + \rho_f C_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (2.2)$$

où l'index  $m$  fait référence au métal et  $f$  au fluide, il faut noter que la température du fluide et du métal qui forment le tube (tuyau qui transporte le fluide) dépendent non seulement du temps mais aussi de l'espace, et que l'objectif de commande est de contrôler la température du fluide à la sortie du conduit donc  $T_f(t, L)$  ou  $L$  est la longueur du conduit. Il faut aussi prendre en compte que les coefficients tel que  $H_t$ ,  $C_f$  et  $\rho_f$  dépendent aussi de la température et donc de l'espace et du temps.  $I(t)$  représente la radiation solaire, et  $q(t)$  le débit de la pompe qui est notre variable de commande. Le reste des symboles et leurs dimensions sont définies dans la table des nomenclatures.

Une simplification de ce modèle négligeant les pertes de chaleur et supposant l'incompressibilité du fluide et la non diffusion, a été utilisée par plusieurs auteurs :

$$A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + q(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = \frac{\eta_{col} G}{\rho_f C_f} I(t) \quad (2.3)$$

Cette équation peut être facilement résolue avec un algorithme itératif en utilisant les différences fini.

On peut trouver d'autres modèles fondamentaux simplifiée, tel que :

### 2.6.2 Modèle à paramètres regroupés

La variation de l'énergie interne du processus peut être donnée par l'équation :

$$C_1 \frac{dT_{out}(t)}{dt} = C_2 I(t) - C_3 (T_{out}(t) - T_{in}(t)) - C_4 \Delta \bar{T}(t) \quad (2.4)$$

Où : les coefficients  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  peuvent être déterminés expérimentalement. Bien que le modèle à paramètres distribués donne une meilleure représentation du comportement dynamique du système, le modèle à paramètres regroupés peut être utilisé pour synthétiser une commande feed-forward .

### 2.6.3 Modèle bilinéaire

Comme il a été mentionné plus haut, plusieurs auteurs ont utilisé un modèle simplifié du système d'équations aux différences partielles, avec le réarrangement des termes, ça peut être exprimée comme :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + v(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = \gamma I(t) \quad (2.5)$$

tel que :  $\gamma = \frac{\eta_{col} G}{\rho_f C_f A_f}$ , supposant une lisse variation de (HTF) ( transfert de chaleur du fluide ), la température distribuée peut être approximée par :

$$\frac{\partial T_t}{\partial l} \Big|_{l \in (l_{i-1}, l_i)} \approx \frac{T_{f_i} - T_{f_{i-1}}}{l}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.6)$$

Où  $l$  représente la longueur de chaque segment,  $n$  est le nombre de segments,  $l_i = il$ ,  $L = nl$  est la longueur du pipe et  $T_{f_i} = T_f(t, il)$  définie la variable d'état  $x_i = T_f(t, il)$ , le processus mécanique peut être décrit par un système d'équations différentielles bilinéaires ordinaires :

$$\frac{dx_i}{dt} = -v \frac{(x_i - x_{i-1})}{l} + \gamma I, \quad i = 1, \dots, n. \quad x_0 = T_{in}$$

Le modèle peut être écrit sous la forme :

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \quad (2.7)$$

Avec :  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$  et :

$$f(x) = \gamma I \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad g(x) = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 - x_1 \\ \vdots \\ x_n - x_{n-1} \end{bmatrix}$$

$f(x)$  dépend de  $x$ ,  $f(0) \neq 0$  et  $g(x) = Bx$  avec :

$$B = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour un nombre  $n$  assez élevé ce modèle décrit raisonnablement les phénomènes à l'intérieur du pipe et donc peut être utilisé pour une commande par retour d'état .

#### 2.6.4 Modèle de résonance

Ce modèle appelé aussi modèle boîte grise (en opposition à modèle boîte noire) qui est un modèle hybride de connaissance et expérimentale, où les paramètres déterminés expérimentalement peuvent être physiquement interprétés. En utilisant le système d'équations vu au dessus et après développement en série de Taylor pour éliminer les non linéarités, nous pouvons trouver un transfert entre le débit du fluide et la température de sortie du pipe.

Cette fonction de transfert est obtenue en supposant les perturbations constantes. De la même manière on peut obtenir les fonctions de transferts reliant les perturbations à la sortie. Ces fonctions de transfert peuvent être utilisées pour la synthèse d'un compensateur feed-forward simplifié .

#### 2.6.5 Modèle empirique

Ce modèle regroupe deux sortes de modèles, linéaires et non linéaires.

##### 1.6.5.1 Modèle linéaire

Dit de boîte noire, obtenu à partir d'identification paramétrique et a été développé par plusieurs auteurs pour des objectifs de commandes. Les modèles obtenus sont, certes une approximation trop grossière du système. Néanmoins, ils sont très utilisés pour le calcul d'une loi de commande simplifiée. On peut classer les modèles linéaires obtenu à partir d'identification paramétrique en deux catégories :

##### A - Modèles d'ordre bas

Ce type de modèle est utilisé pour plusieurs structures de commande. Néanmoins, leurs simplicités peuvent amener le système à un état inacceptable due aux dynamiques non prises en compte (résonance).

##### B - Modèles d'ordre élevé

Pour éviter la résonance, il est nécessaire d'utiliser des modèles d'ordre supérieur, la méthode impose de déterminer le modèle qui décrit mieux le système (degré des différents polynômes et leurs coefficients) en minimisant le critère d'Akaike (Aikake's information criterion).

##### 1.6.5.2 Modèle non linéaire

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées afin d'obtenir des modèles non linéaires du système. Les plus utilisés sont celles basées sur les réseaux de neurones.

Les réseaux artificiels neuronaux sont des outils permettant de représenter les relations fonctionnelles complexes nécessitées par les systèmes de régulation modernes. Les informations enregistrées sont envoyées aux neurones d'un réseau et mémorisées grâce à des facteurs de pondération.

L'apprentissage des réseaux s'effectue sur la base d'exemples réels et si possible en ligne. Étant donné que l'on peut entraîner ces réseaux de neurones à acquérir le comportement souhaité, ils constituent des modules universels faits pour être utilisés là où il s'avère nécessaire de décrire par l'exemple, un comportement complexe et de l'illustrer à l'aide d'une représentation fonctionnelle. Cette méthode de modélisation a été utilisée par plusieurs auteurs et autres afin de modéliser un système thermosolaire.

## 2.7 Modélisation du système

Les collecteurs cylindro-paraboliques sont les plus utilisés dans les centrales thermiques, ils sont constitués des miroirs paraboliques linéaires, qui reflètent et concentrent l'énergie (les radiations) solaire sur un tube (récepteur) positionné le long d'une ligne focale permet de chauffer de l'huile synthétisée aux températures qui assurent la création du vapeur.

La plate forme ACUREX d'Almeria est la plus connue dans l'aspect de recherche, elle est constituée de 10 boucles, chacune est composée de deux rangées de 12 modules. La longueur de chaque boucle est de 172 m, et d'une pompe de fonctionnement limité entre la capacité maximale 12 L/s et la seuil de sécurité 2 L/s.

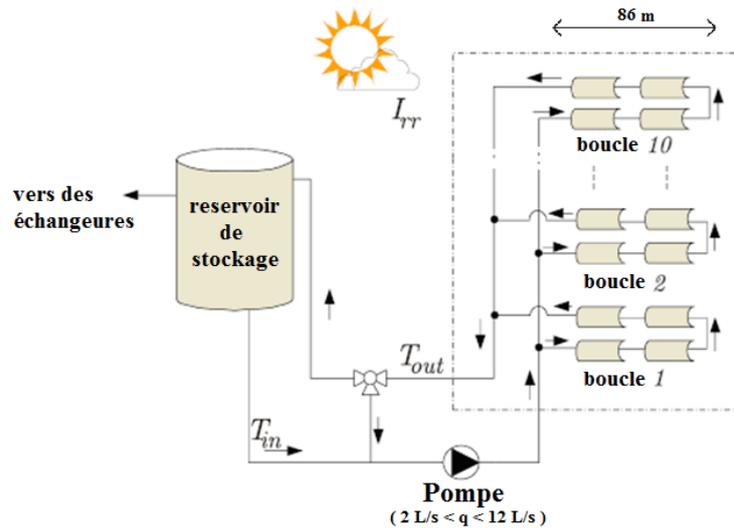


FIGURE 2.16 – schéma de principe du circuit d'huile

### 2.7.1 Bilan énergétique

À partir du bilan énergétique, on trouve le système d'équation différentielle partielle ( *PDE* ) suivant :

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = IK_{opt} \eta_0 G - GH_l (T_m - T_a) - \delta_p H_t (T_m - T_f) \quad (2.8)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial l} = \delta_p H_t (T_m - T_f) \quad (2.9)$$

où l'indice  $m$  fait référence au métal et  $f$  au fluide, et les paramétrés de simulation [12] [33] :

$$\begin{aligned} \rho_f &= 903 - 0.672T_f(i) \text{ (kg/m}^3\text{)} & C_f &= 1820 + 3.478T_f(i) \text{ (J/kg.C}^\circ\text{)} \\ H_l &= 0.00249\Delta\bar{T} - 0.06133 \text{ (W/m}^2\text{.C}^\circ\text{)} & \text{Avec } \Delta\bar{T} &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_a \\ H_t &= (2,17.10^6 - 5,01.10^4 T_f(i) + 4,53.10T_f^2 - 1,64T_f^3 + 2,1.10^{-3}T_f^4)q^{0.8} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_m &= 1100(\text{kg}/\text{m}^3) & C_m &= 840(\text{J}/\text{kg}.\text{C}^\circ) & A_m &= 0.0038\text{m}^2 \\ G &= 1,83\text{m} & K_{opt} &= 0.43 & A_f &= 0.0024\text{m}^2 & \delta &= 0.1257\text{m} \end{aligned}$$

Il est important de noter que seulement les paramètres :  $\rho_m$ ,  $C_m$ ,  $A_f$ ,  $A_m$  et  $G$  sont des constantes. Tant que, les paramètres  $H_l$ ,  $\rho_f$ ,  $C_f$  et  $H_t$  dépendent de l'état.

On discrétise le modèle précédent dans l'espace ( comme [18]), ça nous donne les deux equations (2.10 et 2.11).

Notons que, dans la section suivante, on va reprendre cette étape en introduisant un terme supplémentaire correspond à l'erreur de discrétisation qui dépend de l'état et de la commande (c'est une erreur de l'ordre 2 au lieu de l'ordre 1 : comme ils l'ont fait dans [18] ), pourtant que cette modification va générer des difficultés dans les synthèses des commandes et des observateurs ; elle nous permet d'augmenter l'exactitude du modèle, ce qui implique l'évolution de la fiabilité et la précision de la commande.

Ensuite, on devise le modèle pour les deux cas dans l'espace en  $\frac{N}{2}$  segments ( pour le test de simulation on va prendre 15 segments ), alors les deux equations du modèle parfait deviennent :

$$\rho_m C_m A_m \frac{dT_m(l_i)}{dt} = IK_{opt}\eta_0 G - GH_l(T_m(l_i) - T_a) - \delta_p H_t(T_m(l_i) - T_f(l_i)) \quad (2.10)$$

$$\frac{dT_f(l_i)}{dt} = \frac{\delta_p H_t(T_m(l_i) - T_f(l_i))}{\rho_f C_f A_f} - \frac{q}{A_f \Delta l}(T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})) \quad (2.11)$$

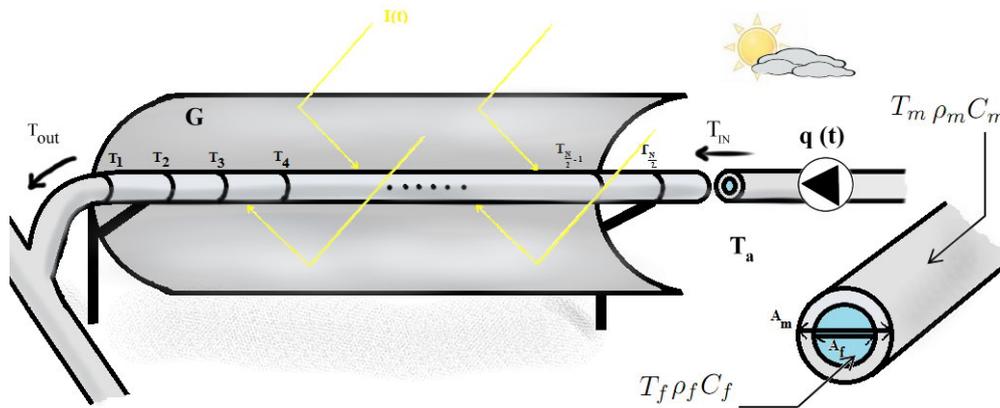


FIGURE 2.17 – schéma de principe du circuit d'huile

## 2.7.2 Représentation d'état

### 1.7.2.1 Modèle d'état parfait :

On présente les matrices dans l'espace d'état trouvés à partir des equations 2.10 et 2.11 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, u)x(t) + B_d(x, u)d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

Tell que  $x$  c'est le vecteur d'état formé par les températures du métal et du fluide des  $\frac{N}{2}$  segments (  $\frac{N}{2}$  pour le métal et  $\frac{N}{2}$  pour le fluide, alors dimension =  $N \times N$  )

aussi :

$T_{in}$  : la température d'entrer.

$I_{eff}$  : l'irradiation solaire efficace.

$T_a$  : la température ambiante.

la commande est le débit du fluide  $u = q$  . et  $d = [ T_{in} \ I_{eff} \ T_a ]^T$

Avec :

$$A(x, u) = \begin{pmatrix} P_4 & P_3 & \cdots & 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & P_2 & & 0 \\ 0 & & P_4 & P_3 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_4 & 0 & 0 & \cdots & P_2 \\ P_1 & 0 & \cdots & 0 & P_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_1 & & 0 & 0 & P_0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_1 & 0 & 0 & \cdots & P_0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

soit :

$$P_0 = \frac{-H_l G - \delta_P H_t}{\rho_m C_m A_m}, \quad P_1 = \frac{\delta_P H_t}{\rho_m C_m A_m}, \quad P_2 = \frac{\delta_P H_t}{\rho_f C_f A_f}$$

$$P_3 = \frac{q}{A_f \Delta l}, \quad P_4 = -P_2 - P_3$$

Et :

$$B_{T_{in}} = \left[ 0 \quad \cdots \quad \frac{q}{A_f \Delta l} \mid 0 \quad \cdots \quad 0 \right]^T$$

$$B_{I_{eff}} = \left[ 0 \quad \cdots \quad 0 \mid \frac{G}{\rho_m C_m A_m} \quad \cdots \quad \frac{G}{\rho_m C_m A_m} \right]^T$$

$$B_{T_a} = \left[ 0 \quad \cdots \quad 0 \mid \frac{H_l G}{\rho_m C_m A_m} \quad \cdots \quad \frac{H_l G}{\rho_m C_m A_m} \right]^T$$

$$B_d(x, u) = \left[ B_{T_{in}} \quad B_{I_{eff}} \quad B_a \right] \quad \text{et} \quad C = \left[ 1 \quad 0_{1 \times N-1} \right]$$

On a finalement :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}} \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}+1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{N-1} \\ \dot{x}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_4 & P_3 & \cdots & 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & P_2 & & 0 \\ 0 & & P_4 & P_3 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_4 & 0 & 0 & \cdots & P_2 \\ P_1 & 0 & \cdots & 0 & P_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_1 & & 0 & 0 & P_0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_1 & 0 & 0 & \cdots & P_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{\frac{N}{2}} \\ x_{\frac{N}{2}+1} \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{q}{A_f \Delta l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_l G}{\rho_m C_m A_m} \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_l G}{\rho_m C_m A_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_l G}{\rho_m C_m A_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{in} \\ I_{eff} \\ T_a \end{pmatrix}$$

### 1.7.2.2 Modèle d'état avec prise en compte des incertitudes de discrétisation :

La solution exacte des équations différentielles partielles (EDP) n'est pas toujours facile à trouver. Par conséquent, pour l'analyse du modèle et la commande du processus ; plusieurs méthodes numériques ont été présentées (modèle bilinéaire, distribuée ... etc ) pour résoudre l'EDP qui permet d'obtenir une approximation de la solution exacte. Alors, cette approximation oblige l'existence d'une erreur de discrétisation.

Pour s'approcher à la solution réelle qui nous permet d'augmenter la précision de la commande qui donne des meilleurs performances, on ajoute à notre modèle distribué une erreur de troncature présente les termes incertains.

Sachant que l'erreur de troncature est à la différence entre la solution exacte qui est décrite par la série de Taylor et la solution numérique classique, en générale de premier ordre comme il est montrée ci-dessous .

Soit le développement de Taylor ( solution exacte  $y_b$  ) :

$$y(b) = y(a) + (b - a)y'(a) + \frac{(b - a)^2}{2}y''(a) + \dots + \frac{(b - a)^n}{n!}y^n(a) \quad (2.14)$$

Et soit le développement d'ordre 1 ( l'approximation faite à 2.11 ) :

$$y(b) = y(a) + (b - a)y'(a) + E \quad (2.15)$$

Avec : E est l'erreur de troncature.

Revenant à notre equation, pour l'introduction des erreurs de troncature et de modélisation, on prend les mêmes equations 2.8 et 2.9 tel que :

$$\frac{\partial T_f(l_i)}{\partial l} = \frac{T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})}{\Delta l} + O(\Delta l) \quad (2.16)$$

Avec :

$O(\Delta l)$  est l'erreur de discrétisation de premier ordre.

Sachant que :

$$O(\Delta l) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T_f(l_i)}{\partial l^2} \Delta l \quad (2.17)$$

Et :

$$\frac{\partial^2 T_f(l_i)}{\partial l^2} = \frac{1}{\Delta l^2} [T_f(l_{i-1}) - 2T_f(l_i) + T_f(l_{i+1})] + O(\Delta l^2) \quad (2.18)$$

En introduisant cette erreur dans le système (2.16), on obtient :

$$\frac{dT_f(l_i)}{dt} = \frac{\delta_p H_i (T_m(l_i) - T_f(l_i))}{\rho_f C_f A_f} - \frac{q}{A_f \Delta l} [T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})] + \xi(x(t), q) \quad (2.19)$$

D'après les équations, l'erreur dépend de l'état et de la commande et aussi existe dans tous les états du fluide, ce qui peut générer des difficultés dans l'analyse de convergence. Dans la suite, on supposera que cette erreur est une fonction différentiable par rapport au temps et bornée avec une dérivée par rapport au temps aussi bornée.

En suite, on présente le nouveau modèle dans l'espace d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, u)x(t) + B_d d(t) + \xi(x(t), u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.20)$$

Avec :

$$\xi(u, x(t)) = \begin{pmatrix} \xi_1(u, x(t)) \\ \vdots \\ \xi_{\frac{N}{2}}(u, x(t)) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in R^N \text{ sont les termes incertains ou les erreurs de troncature,}$$

bornés :

$$\exists M_i > 0, \forall t > 0 : \sup \| \xi_i(u, x(t)) \| \leq M_i$$

## 2.8 Simulation avec régulateur PID

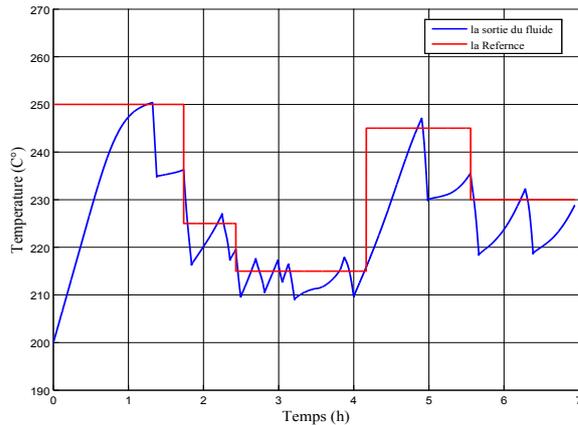


FIGURE 2.18 – Résultat de la poursuite de référence

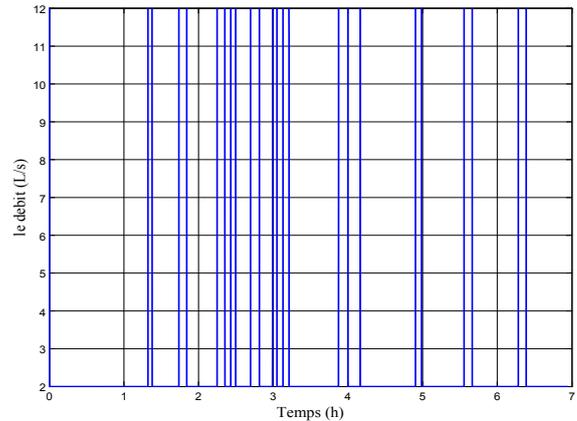


FIGURE 2.19 – La variation de commande

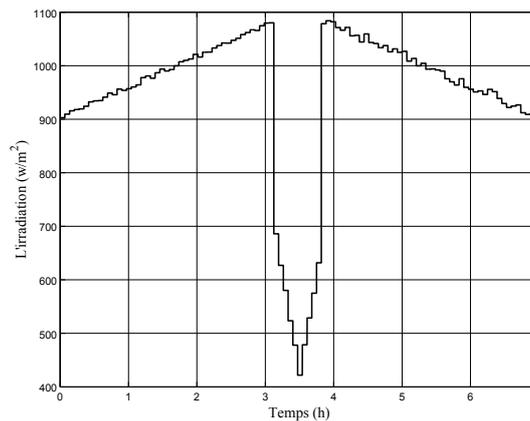


FIGURE 2.20 – L'irradiation solaire

Nous pouvons remarquer qu'un simple régulateur PID n'est pas suffisant pour réaliser la poursuite de la référence, tel que, des oscillations apparaissent dans la réponse du système, il est aussi remarquable que la commande oscille avec des grandes fréquences.

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la notion générale des systèmes solaires thermiques et leur principes de fonctionnement, puis on a classifié les différents types des stations solaires thermiques, ensuite, nous avons cité les approches existant dans la littérature pour modéliser un système. Pour notre travail nous avons pris la station solaire à capteur cylindro-parabolique car ce type de station est le plus utilisé, par le modèle à paramètres distribués. En premier temps, les erreurs de discrétisation sont négligées, cela donne le premier système nommé "système parfait". Ensuite, l'introduction des erreurs de troncature nous ramène au "système incertain".

Enfin, nous avons étudié la réponse du système régulé avec un PID et montré les limites de son utilisation, ainsi que la nécessité d'utiliser les techniques de l'automatique avancée afin de réguler ce système.

# Chapitre II

---

Commande par

$H_{\infty}$

# Chapitre 3

## Commande par $H_\infty$

### 3.1 Introduction

La commande  $H_\infty$  (appelée encore commande fréquentielle avancée ou commande robuste multivariable) est une nouvelle approche de l'Automatique Fréquentielle, elle a été initiée par Zames au début des années 80, et développée en particulier par Doyle, Glover [30]. Sa principale caractéristique est de permettre de modéliser différents transferts d'un système asservi, tout en garantissant la stabilité en boucle fermée. Elle permet également la prise en compte de certains objectifs de robustesse, tels que la garantie de marges de stabilité ou la robustesse aux dynamiques hautes fréquences mal connues ou non modélisées.

Dans ce chapitre, on va présenter tout d'abord quelques outils nécessaires à l'approche  $H_\infty$  à savoir : les erreurs de modélisation, problème de robustesse, les fonctions de sensibilité et la notion de problème standard.

Puis nous allons mettre en œuvre cette approche, dans le but de la synthèse d'un régulateur robuste en vue de la stabilisation et la régulation du trajectoire désirée, tel que, on essaie de synthétiser des lois de commandes robustes pour le modèle linéaire, (on linéarise le système autour d'un point de fonctionnement) et on le prendra comme modèle " nominal ". Finalement, on utilise les mêmes paramètres de commande sur le modèle non linéaire.

### 3.2 Modélisation d'un système incertain

L'incertitude peut être classifiée dans deux catégories : les signaux de perturbation et l'erreur de modélisation. La première inclut les perturbations d'entrée (les bruits ... etc), et la deuxième représente l'anomalie entre le modèle mathématique et la dynamique réelle du système car un modèle mathématique de n'importe quel vrai système est toujours une approximation de la réalité.

Les sources principales de cette anomalie est la dynamique non modelée ( généralement à haute fréquence ) et la négligence de la non-linéarités dans la modélisation et les variations paramétriques du système dues aux changements de l'environnement.

#### 3.2.1 Erreur de modélisation

On parle toujours sur les erreurs de modélisation car ces erreurs peuvent influencer sur la stabilité et sur les performances de régulateur, pour cela on parle de robustesse qui exprime l'aptitude du système à garder sa stabilité en boucle fermée en présence de ces erreurs.

En général, les erreurs de modélisation sont significatives en hautes fréquences car le système est bien connu en basses fréquences.

On trouve plusieurs types de représentation de ces erreurs :

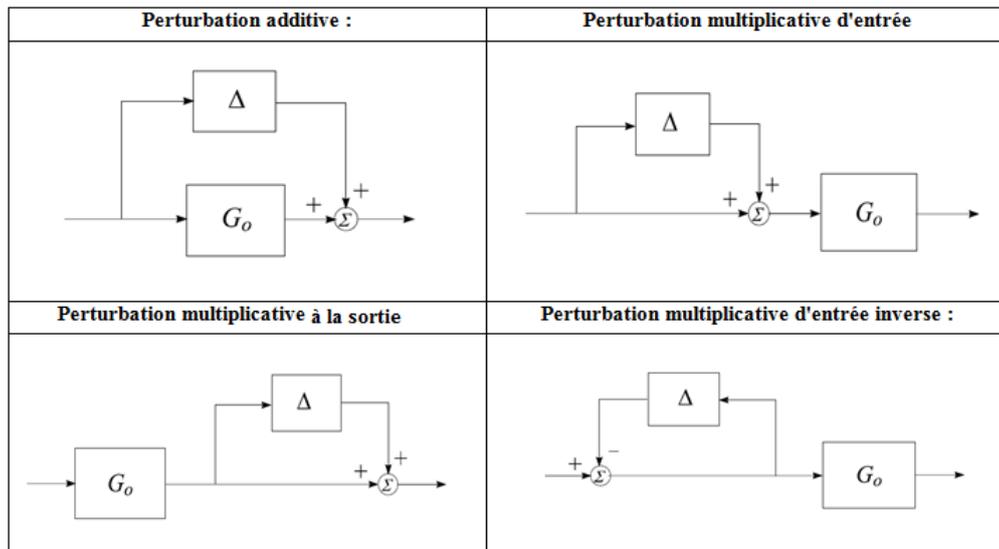


FIGURE 3.1 – Les différents types de représentation des erreurs de modélisation

### 3.2.2 Principe de la commande $H_\infty$

#### 2.2.2.1 Théorème des petits gains [23]

Si  $G_1(s)$  et  $G_2(s)$  sont deux fonctions de transferts stables i.e.,  $G_1(s) \in H_\infty$ ,  $G_2(s) \in H_\infty$  alors le système en boucle fermée est stable si et seulement si :

$$\|G_1 G_2\|_\infty < 1 \quad \text{et} \quad \|G_2 G_1\|_\infty < 1 \quad (3.1)$$

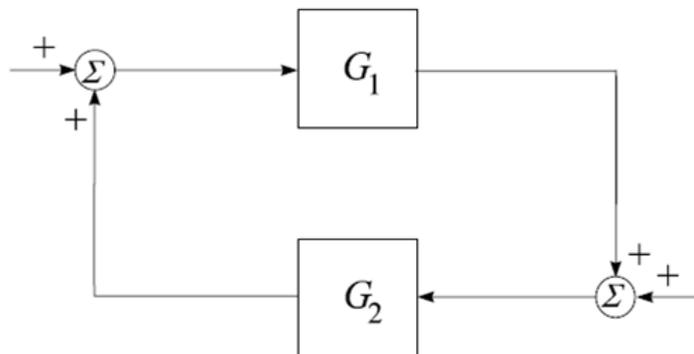


FIGURE 3.2 – Théorème des petits gains : stabilité robuste

La stabilité en boucle fermée est sensible aux erreurs de modélisation du système ( $\Delta G(s)$ ) et aux dérivées de la commande ( $\Delta K(s)$ ). Assurer la stabilité du modèle nominal bouclé n'est donc pas suffisante. Il faut également garantir la stabilité de tous les systèmes atteignables par les perturbations  $\Delta G$  et  $\Delta K$  admissibles, parmi lesquels se trouve le système réel lui-même. La stabilité est dite " robuste " lorsque cette garantie supplémentaire est fournie.

Pour comprendre l'influence des erreurs de modélisation dans la boucle fermée, on considère le type montré dans la figure ( 3.3 ), où on a une erreur de perturbation additive :

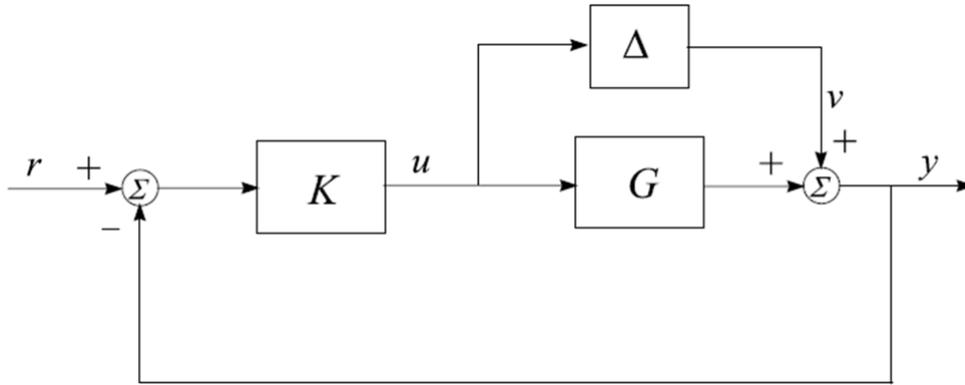


FIGURE 3.3 – Configuration d'une perturbation additive

Il est facile de montrer que la fonction de transfert du signal  $v$  à  $u$  est  $T_{uv} = -K(I + GK)^{-1}$ .

Par le théorème des petits gains, la condition de stabilité sera :

$$\|\Delta K(I + GK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (3.2)$$

Ou :

$$\|K(I + GK)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty} \quad (3.3)$$

pour concevoir un contrôleur robuste qui stabilise le plus grand possible un ensemble des perturbations et des erreurs de modélisation, dans le sens de la norme  $\infty$ , il est alors clair que nous devons résoudre le problème suivant de minimisation :

$$\min_{K \text{ stabilisation}} \|K(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (3.4)$$

Dans des nombreux cas, nous pouvons avoir la connaissance a priori de la perturbation :

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \leq \bar{\sigma}(W_2(j\omega)) \quad \text{pour tout } \omega \in \mathbb{R} \quad (3.5)$$

nous pouvons récrire le bloc de perturbation comme :

$$\Delta(s) = \tilde{\Delta}(s)W_2(s) \quad (3.6)$$

Où  $\tilde{\Delta}(s)$  est la norme unitaire de la perturbation, la condition de stabilité robuste devient :

$$\|W_2K(I + GK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (3.7)$$

Et le problème d'optimisation sera :

$$\min \|W_2K(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (3.8)$$

Pour les autres types de perturbation :

1. Perturbation additive inverse :

$$\|G(I + KG)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty} \quad (3.9)$$

2. Perturbation multiplicative d'entrée :

$$\|KG(I + KG)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty}$$

3. Perturbation multiplicative de production :

$$\|GK(I + KG)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty}$$

4. Perturbation multiplicative d'entrée inverse :

$$\|(I + KG)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty}$$

5. Perturbation multiplicative de production inverse :

$$\|(I + GK)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty}$$

Les critères les plus utilisés dans la commande  $H_\infty$  sont :

1. Pour le suivi de trajectoire

$$\|(I + GK)^{-1}\|_\infty$$

2. Pour le rejet de perturbation

$$\|(I + GK)^{-1}\|_\infty$$

3. Pour le rejet de bruit

$$\|-(I + GK)^{-1}GK\|_\infty$$

4. Pour moins d'énergie de contrôle

$$\|K(I + GK)^{-1}\|_\infty$$

On appelle  $S$  la fonction de sensibilité qui indique la sensibilité de la sortie  $y$  aux perturbations, et soit  $T$  la fonction de sensibilité complémentaire avec :

$$S = \|(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad T = \|(I + GK)^{-1}GK\|_\infty \quad (3.10)$$

L'un des critères les plus utilisés est le rejet de perturbation et la poursuite (c'est à dire minimiser  $S$ ) et la robustesse vis à vis les erreurs de modélisation (multiplicative à la sortie) (c'est à dire minimiser  $T$ ), donc minimiser  $S/T$  ce qui correspond à l'un des choix de la sensibilité mixte et implique la recherche d'un contrôleur  $K$  qui minimise :

$$\left\| \begin{array}{c} S \\ T \end{array} \right\|_\infty \quad \text{ou} \quad \left\| \begin{array}{c} (I + GK)^{-1} \\ (I + GK)^{-1}GK \end{array} \right\|_\infty \quad (3.11)$$

La formulation ci-dessus s'avère en pratique trop rigide car elle ne laisse aucun élément de choix au concepteur. En conséquence de ça, la synthèse effectuée en utilisant ce critère, ne permet pas d'atteindre des performances acceptables. Pour contourner cet obstacle, généralement, dans le cadre de la synthèse, les fonctions de transfert sont pondérées par des filtres qui permettent d'imposer les performances désirées (Le suivi de trajectoire, l'élimination de l'erreur statique, la réduction des oscillations en régime permanent).

$$\left\| \begin{array}{c} W_1 S \\ W_2 T \end{array} \right\|_\infty \quad \text{ou} \quad \left\| \begin{array}{c} W_1 (I + GK)^{-1} \\ W_2 (I + GK)^{-1} GK \end{array} \right\|_\infty \quad (3.12)$$

### 3.2.3 Forme standard de la commande $H_\infty$

le problème  $H_\infty$  est un problème de réjection de perturbation. Il consiste à minimiser l'effet d'une perturbation  $w$  sur le comportement du système. Son effet sur le système est mesuré par la norme d'un vecteur " coût  $z$  ". tel que, on peut agir sur le système par une commande  $u$  et on dispose d'une observation  $y$ . Il s'agit donc de synthétiser une loi de commande  $u = K(s).y$  qui minimise l'impact de  $w$  sur  $z$ .

La forme standard de la commande  $H_\infty$  est représenté schématiquement par la Figure ( 3.4 ) :

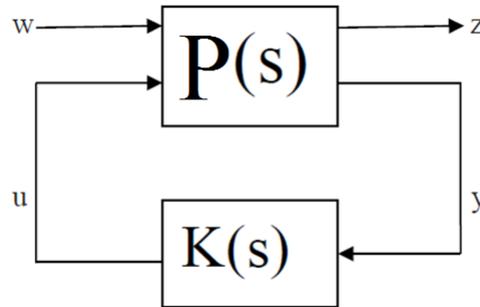


FIGURE 3.4 – La forme standard de la commande  $H_\infty$

Avec :

- $w$  : perturbation, bruits de mesure, références ...
- $u$  : l'entrée de commande.
- $z$  : quantificateur de performance.
- $y$  : signaux de mesure.

La fonction de transfert  $P(s)$  décrit les inter-connexions entre  $w, u, z$  et  $y$  :

$$\begin{pmatrix} z \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ u \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

La fonction de transfert en boucle fermée de  $w$  à  $z$  est donné par :

$$z = [p_{11} + p_{12}K(I - p_{22}K)^{-1}p_{21}]w = F_1(P, K)w \quad (3.14)$$

#### Problème $H_\infty$ Optimal

minimiser  $\|F_1(P, K)\|_\infty$  sur l'ensemble des compensateurs  $K(s)$  qui stabilisent le système de manière interne. Le minimum est noté  $\gamma_{opt}$  et appelé gain (ou atténuation) "  $H_\infty - optimal$  ". Le problème sous-optimal associé joue également un rôle important.[2]

#### Problème $H_\infty$ Sous-optimal

étant donné  $\gamma > 0$ , trouver un compensateur  $K(s)$  qui stabilise le système de manière interne et assure  $\|F_1(G, K)\|_\infty < \gamma$

### 3.3 développement de la commande sur le système

On choisit la synthèse de sensibilité  $S/T$ , et on place les filtres de pondération comme la fig(3.5) le montre :

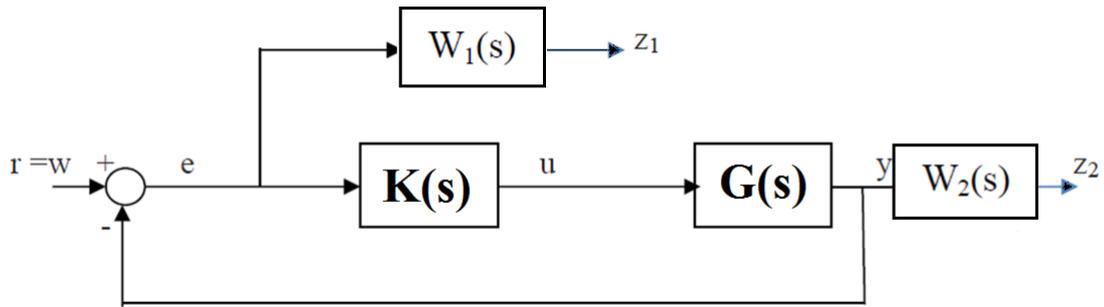


FIGURE 3.5 – mise sous forme standard

Soit le schéma à suivre :

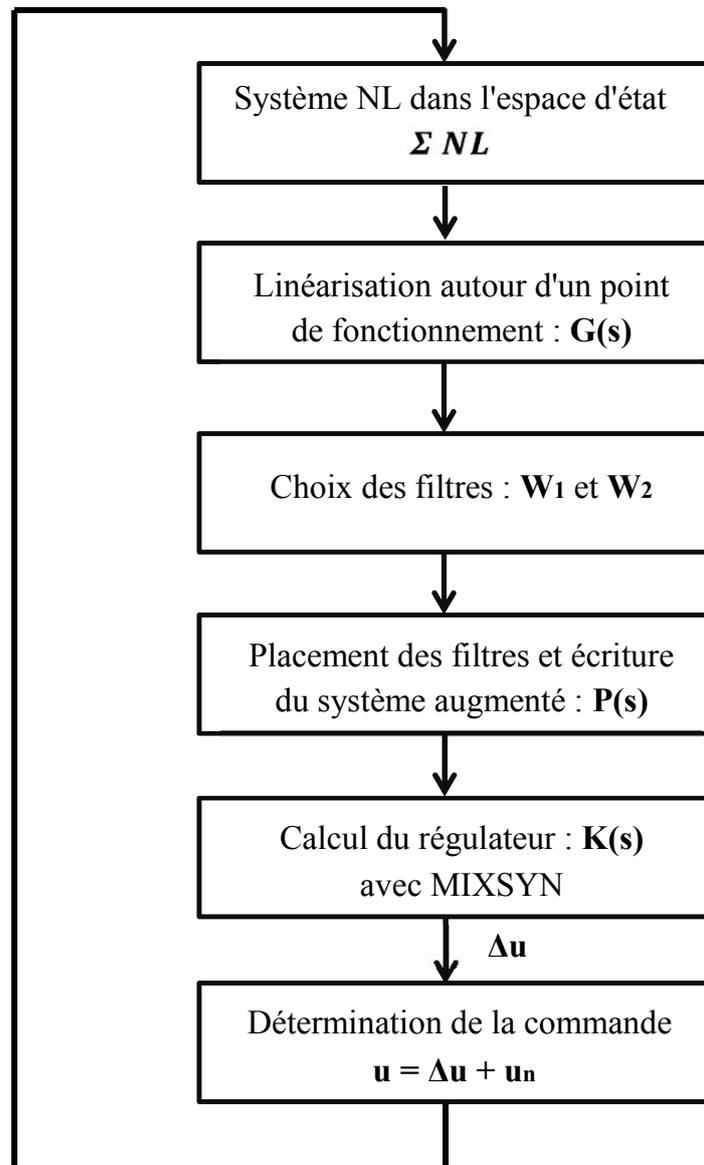


FIGURE 3.6 – Organigramme traçant les étapes d'application de la commande  $H_\infty$

Tel que, on a pris :  $z_1 = W_1 e$ ,  $z_2 = W_2 y$  et  $w = r$ .

$$P = \begin{pmatrix} W_1 & -W_1 G \\ 0 & W_2 G \\ I & -G \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Avec :

$$p_{11} = \begin{pmatrix} W_1 \\ 0 \end{pmatrix}, p_{12} = \begin{pmatrix} -W_1 G \\ W_2 G \end{pmatrix}, p_{21} = (I), p_{22} = (-G).$$

### 3.3.1 Choix des pondérations

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la valeur des pondérations  $W_1$  et  $W_2$ , On prend :

$$W_1(S) = \frac{\frac{S}{M} + w_0}{S + w_0 A} \quad W_2(S) = \frac{\frac{w_0}{M} + S}{w_0 + AS}$$

Telle que :

$w_0$  : la bande passante désirée

$M$  : le pic de la sensibilité

$A$  : le maximum de l'offset toléré.

$W_1$  : est choisie de sorte à ce qu'elle soit un filtre passe-bas, ce qui va forcer la sensibilité  $S$  à basses fréquences à rejeter les perturbations et de réduire l'erreur de poursuite.

$W_2$  : est choisie de sorte à ce qu'elle soit un filtre passe-haut, ce qui va forcer la sensibilité complémentaire  $T$  à hautes fréquences à minimiser l'effet déstabilisant des bruits de mesure et des erreurs de modélisation multiplicatives.

### 3.3.2 Calcul de la commande

Soit le modèle 2.20 incertain qui est expliqué dans le premier chapitre :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= A(x, u)x + B_d d(t) + \xi(x, u) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \quad (3.16)$$

le calcul de la commande passe par deux étapes :

1 - Linéarisation

2 - Choix des pondérations

#### 2.3.2.1 Linéarisation

Pour faire cette linéarisation, on prend les valeurs nominale de ces paramètres :

$$H_l = 0.00249 \left( \frac{x_1 + T_{in}}{2} \right) - 0.06133$$

$$\rho_f = 903 \quad C_f = 1820 \quad T_{in_n} = 200$$

On linéarise le système autour du point de fonctionnement suivant (on prend  $N = 30$ ) avec  $x$  et  $u$  nominale :

$$x_n = [240, 236, 233, 229, 223, 219, 225, 222, 218, 214, 209, 205, 202, 198, 193] \quad u_n = 6L/s$$

Comme :

$$A(x_n, u_n) = \frac{\partial(A(x, u)x + B_d d(t))}{\partial x} \Big|_{(x_n, u_n)} \quad \text{et} \quad B(x_n, u_n) = \frac{\partial(A(x, u)x + B_d d(t))}{\partial u} \Big|_{(x_n, u_n)}$$

Le système 3.16 devient :

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A(x_n, u_n)\Delta x + B(x_n, u_n)\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x \end{cases} \quad (3.17)$$

Avec :

$$A(x_n, u_n) = \begin{pmatrix} p'_{2n} & \frac{u_n}{A_f \Delta l} & \cdots & 0 & p_{2n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p'_{2n} & \ddots & 0 & 0 & p_{2n} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \frac{u_n}{A_f \Delta l} & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{2n} & 0 & 0 & \cdots & p_{2n} \\ p_{1n} & 0 & \cdots & 0 & p_{0n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{1n} & & 0 & 0 & p_{0n} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{1n} & 0 & \cdots & 0 & p_{0n} \end{pmatrix}, \quad p'_{2n} = -p_{2n} - \frac{u_n}{A_f \Delta l} \quad (3.18)$$

Et :

$$B(x_n, u_n) = \begin{pmatrix} \frac{x_{2n} - x_{1n}}{A_f \Delta l} & \frac{x_{3n} - x_{2n}}{A_f \Delta l} & \cdots & \frac{-x_{\frac{N}{2}n} + T_{in}}{A_f \Delta l} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}^T \quad (3.19)$$

Donc on aura la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = C(SI - A)^{-1}B \quad (3.20)$$

### 2.3.2.2 Choix des pondérations

On choisit les filtres suivants :

$$W_1 = \frac{s + 80}{4s + 4} \quad W_2 = \frac{20s + 100}{s + 400}$$

Pour le calcul de commande on utilise la fonction mixsyn qui est détaillée dans (Robust toolbox matlab [3]) Le correcteur  $K(s)$  est :

$$K(s) = \frac{-3334503.0248(s + 348.5)(s + 400)(s + 10.7)}{(s + 2.778 * 10^5)(s + 3344)(s + 179)(s + 1)} \quad \text{et} \quad \gamma = 0.9844$$

On applique la commande qu'on a trouvé sur le système non linéaire avec  $u = u_n + \Delta u$ .

### 3.4 Simulation

#### 3.4.1 Système parfait

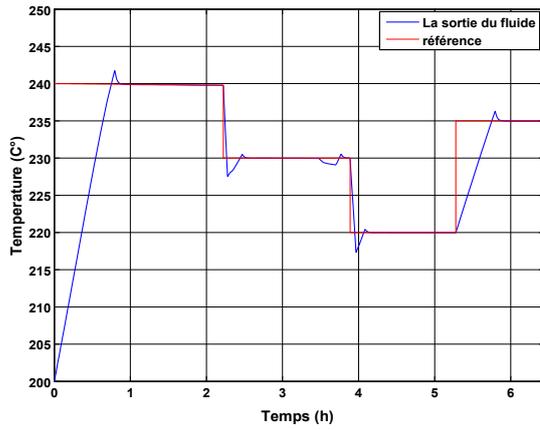


FIGURE 3.7 – la poursuite de référence

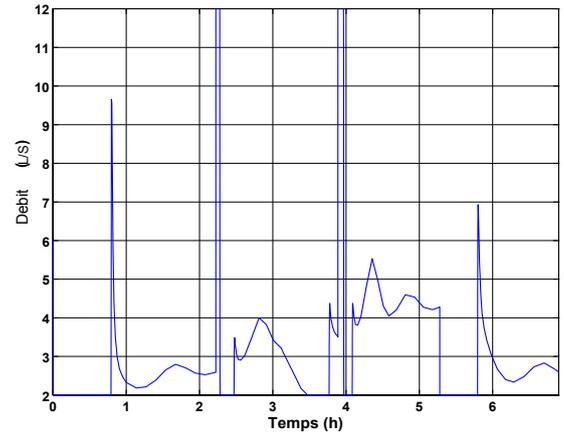


FIGURE 3.8 – La variation de la commande

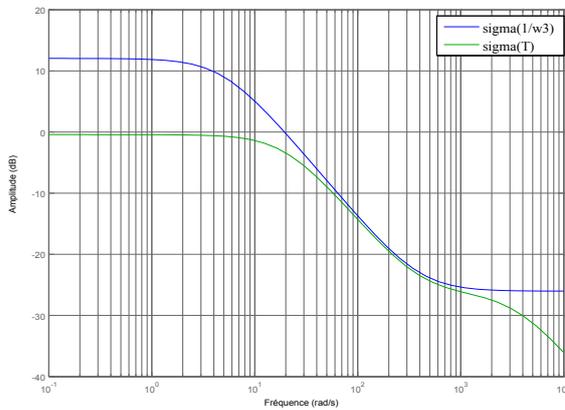


FIGURE 3.9 – Les valeurs singulières de  $T(s)$  et  $1/W_2$

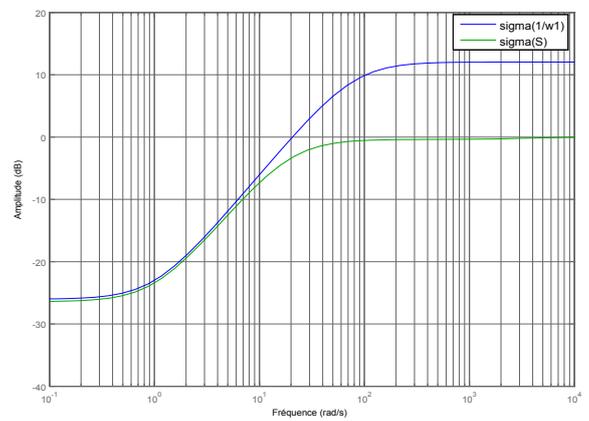


FIGURE 3.10 – Les valeurs singulières de  $S(s)$  et  $1/W_1$

#### 3.4.2 Système incertain

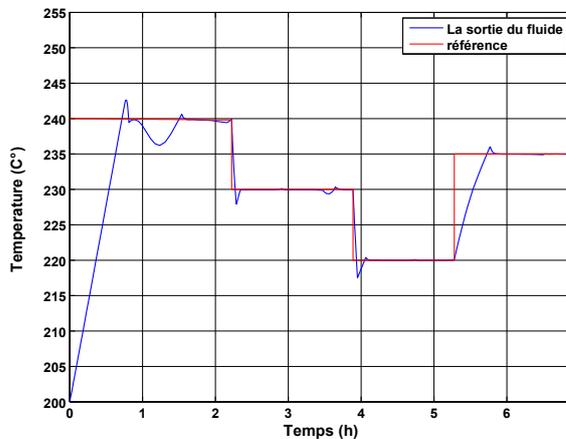


FIGURE 3.11 – la poursuite de référence

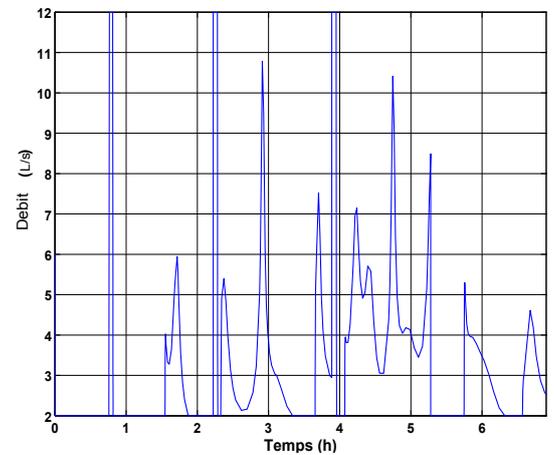


FIGURE 3.12 – La variation de la commande

On remarque d'après les valeurs singulières de  $S(s)$  et  $T(s)$ , que les objectives désirées sont bien vérifiées :

#### A - En basse fréquence :

Minimiser la sensibilité de la boucle fermée pour un rejet de perturbation maximale ce qui maximise la sensibilité complémentaire pour une poursuite parfaite (objective compatible).

#### B - En haute fréquence :

Minimiser la sensibilité complémentaire pour compenser l'augmentation de l'erreur de modélisation.

La fig (3.7) qui représente la réponse du système parfait, montre que la sortie suit la référence, malgré l'application de la commande trouvée à partir du modèle linéaire ( la linéarisation de l'équation d'état de sortie est faite autour de  $240\text{ C}^\circ$  ) sur le modèle non linéaire, elle montre aussi l'existence d'une erreur statique nulle, un bon temps de réponse et un petit dépassement dans le régime transitoire.

Pourtant que la référence est éloigné par rapport à notre point de fonctionnement (où on fait la linéarisation) on atteint la consigne avec un dépassement considérable. Pour les systèmes incertain, les performances ont diminué et le débit présente des variations considérables, mais les résultats restent quand même satisfaisantes, et ils sont justifiés par la robustesse de la commande  $H_\infty$  par rapport aux non-linéarités et aux erreurs de modélisation.

### 3.5 Tests de robustesse

Le fluide utilisée dans la station solaire possède plusieurs paramètres qui peuvent être influé par des changements de température et de pression... ces paramètres dépendent aussi de la température du fluide qui est mesuré par des capteurs qui donnent des mesures bruitées, ce qui a comme conséquence : l'incertitude dans les résultats et la diminution de la précision des paramètres. pour cela, on va changer les paramètres  $\rho_f, H_l, H_t$  et  $C_f$  pour pouvoir tester les performances de la commande par  $H_\infty$  utilisée pour le système incertain puis pour le système parfait.

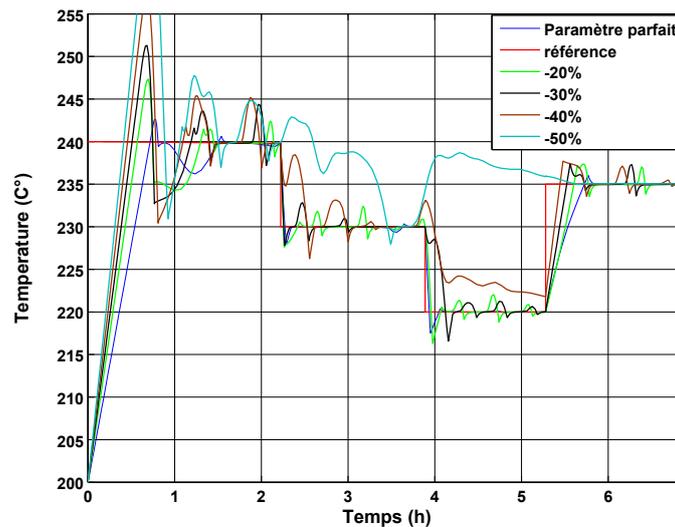


FIGURE 3.13 – résultats avec la variation des paramètres du fluide pour le système incertain

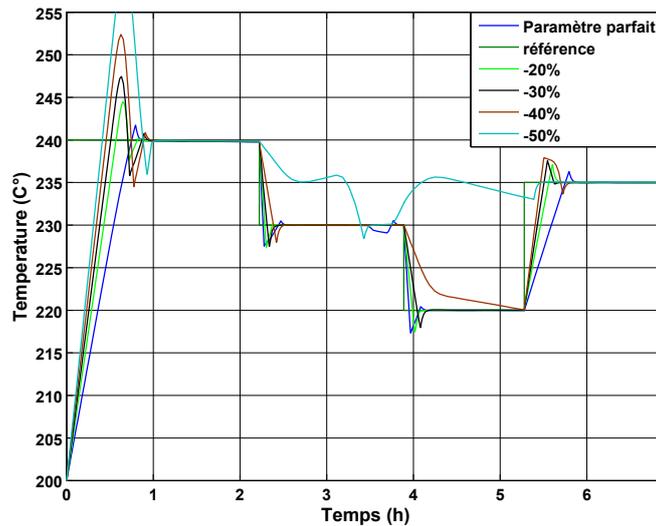


FIGURE 3.14 – résultats avec la variation des paramètres du fluide pour le système parfait

Nous remarquons que les réponses suivent la référence dans le régime permanent, un dépassement augmente dans le régime transitoire en fonction de l'augmentation du pourcentage de variation paramétrique, jusqu'à -50%, on aura dans ce cas une réponse qui ne suit pas totalement la référence, et on remarque que le modèle incertain est plus sensible par rapport à ces variations.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué une commande robuste,  $H_\infty$  sur un système d'une station solaire thermique.

La commande a été calculée après la linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement, où nous avons minimisé la norme infinie des deux fonctions, la sensibilité et la sensibilité complémentaire afin d'imposer les performances désirées pour le système non linéaire.

Cette commande a prouvé sa robustesse vu les bonnes réponses qu'elle a données en présence des erreurs dues à la linéarisation et la discrétisation. Cependant, dans le cas des variations paramétriques, on aura une diminution de performance particulièrement dans le système incertain, mais en atteignant toujours la référence imposée.

# Chapitre III

---

Commande par

Mode de glissement

# Chapitre 4

## Commande par mode glissant

### 4.1 Introduction

Généralement, les processus physiques sont non linéaires, mal définis, perturbée et ont des paramètres variables, lorsque la partie commandée du processus est faiblement perturbée, les algorithmes de commande classiques ( par exemple à action proportionnelle intégrale dérivée (PID) ) peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et la performance du système ne sont pas trop strictes. [24]

Dans le cas contraire et particulièrement lorsque la partie commandée est soumise à des fortes non linéarités et à des variations temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commandes assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations, aussi vis-à-vis des erreurs de modélisation, pour cela on devrait concevoir une commande robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux ces incertitudes, et aux perturbations (radiation solaire ,température du fluide d'entrée ,température ambiante...) et aux erreurs de troncatures. la commande par mode glissant c'est l'une des algorithmes robustes très utilisée en pratique à cause de la simplicité à implémenter,comme elle a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées .

### 4.2 Notion commande par mode glissant

L'idée de la commande par mode glissant est d'amener les états à évoluer vers une hyper-surface appelée surface de glissement, le choix de cette surface dépend de la dynamique et du mode de stabilisation désirés pour le système en boucle fermée. le système est dit alors en régime glissant et se trouve dans l'état du "système réduit " et libre de dimension inférieure du nombre d'entrée à la dimension du système original. Par suite, sa dynamique devient insensible aux variations paramétriques, aux erreurs de modélisation (dans une gamme qui reste large par rapport à celles des algorithmes classiques), et aux perturbations.

la méthode de réglage par mode de glissement possède aussi des inconvénients tel que : les retards de commutation qui engendrent des oscillations autour de la surface de glissement, cette imperfection peut exciter des dynamiques non modélisées, soumettront alors les organes de commande à une intense activité (forte sollicitation des organes de commande) ce qui peut être néfaste pour les actionneurs.

### 4.3 Conception de la commande par mode glissant

On considère le système non linéaire suivant :

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} &= f(x(t), u(t)) \\ y &= h(x(t)) \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec : l'entrée  $u(t) \in R^m$ , le vecteur d'état  $x(t) \in R^n$ , la sortie  $y \in R^p$ ,  $f$  et  $h$  sont deux fonctions  $C^\infty$ .

La réalisation d'un contrôleur par mode glissant  $u(x, t)$  pour le système  $\Sigma$  se fait en trois étapes :

- 1- Choix de la surface de glissement.
- 2- Établissement des conditions d'existence et de convergences.
- 3- Établissement de la loi de commande.

#### 4.3.1 Choix de la surface de glissement.

Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de consigne  $y_r$ , cette fonction est donnée par l'équation :

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (4.2)$$

Avec :

- $x$  : variable à commander.
- $e(x)$  : l'erreur de poursuite =  $y - y_r$ .
- $\lambda_x$  : une constante positive qui fixe la dynamique de la surface.
- $r$  : le degré relatif du système.

#### 4.3.2 Établissement des conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système.

##### A - Fonction directe de commutation

Cette approche est la plus ancienne, elle a été proposée par EMILYANOV et UTKIN. Elle est globale mais ne garantit pas en revanche un temps d'accès fini.

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{lorsque } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{lorsque } S(x) > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Où bien :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (4.4)$$

Cette condition est toutefois difficile à utiliser pour faire la synthèse de la loi de commande, Particulièrement dans le cas d'un système multi-entrées.

## B - Approche de LYAPOUNOV

Il s'agit de formuler une fonction scalaire définie positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction. Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse, et pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires.

On définit la fonction de Lyapounov par :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (4.5)$$

Pour que la fonction de Lyapounov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative :

$$\dot{V}(x) < 0 \quad \text{avec} \quad V(x) > 0 \quad (4.6)$$

Ceci est vérifié si :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (4.7)$$

Cette équation explique que le carré de la distance vers la surface, mesurée par  $S^2(x)$ , diminue tout le temps, contraignant ainsi la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux cotés. Cette condition de convergence suppose un régime de glissement idéal.

Dans le cas d'un régime glissant pratique, la condition de convergence prend la forme suivante :

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t}(S^2) \leq -\gamma|S| \quad (4.8)$$

Où :  $\gamma > 0$ .

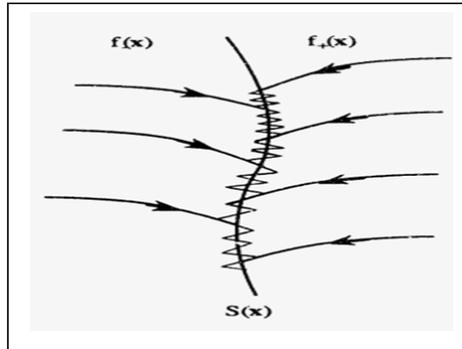


FIGURE 4.1 – Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement

### 4.3.3 Établissement de la loi de commande

Dans le but de forcer les trajectoires d'états du système à atteindre la surface de glissement et le contraindre à rester sur la surface de glissement malgré la présence d'incertitudes, la commande  $u$  contient deux termes :  $u = u_{eq} + u_r$ , **le premier** appelé « la commande équivalente » qui est un moyen de déterminer le comportement du système lorsque un régime glissant idéal est établi, calculée donc à partir de la condition d'invariance de la surface :

$$\begin{cases} S(x, t) = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Ce que revient à l'expression :

$$u_{eq}(x, t) = - \left[ \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^T g(x, t) \right]^{-1} \left\{ \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^T f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right\} \quad (4.10)$$

Le deuxième est une fonction discontinue calculée en vérifiant la condition d'attractivité :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0$$

Elle est généralement de la forme :  $u_r = -K \text{sign}(S)$ .

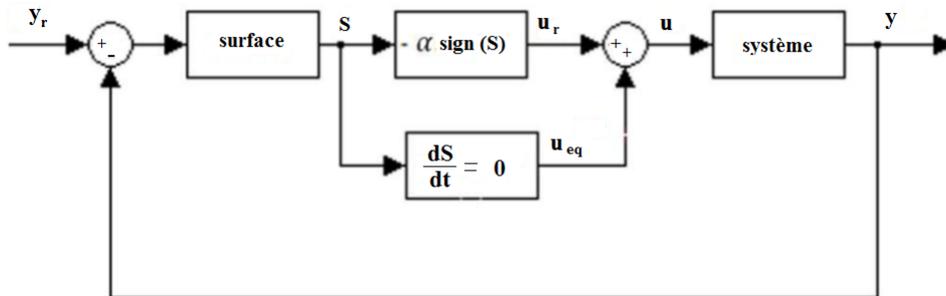


FIGURE 4.2 – Principe de la commande par mode glissant

#### 4.3.4 Phénomène de Chattering

Le deuxième terme de la commande  $u$  a la particularité d'induire des oscillations autour de la surface (phénomène de Chattering), qui peut être éliminé en remplaçant la fonction discontinue  $\text{sign}$  par la fonction continue de saturation :

$$\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) = \begin{cases} \text{sign}(S) & \text{si } |S| \geq \phi \\ \frac{S}{\phi} & \text{si } |S| \leq \phi \end{cases} \quad \begin{cases} 1 & \text{si } S > \phi \\ -1 & \text{si } S < -\phi \end{cases} \quad (4.11)$$

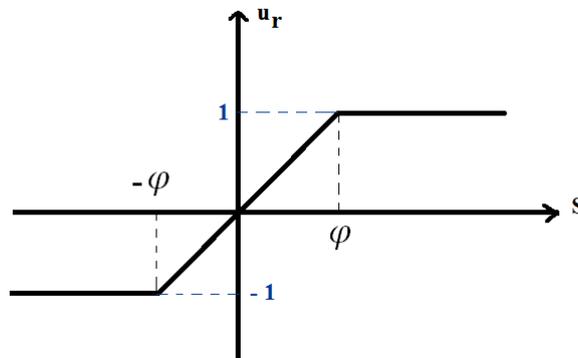


FIGURE 4.3 – La fonction de saturation

### 4.4 Développement de la commande sur le collecteur cylindro-parabolique

#### 4.4.1 Choix de la surface de glissement

À partir de notre modèle développé au chapitre 1, il est bien évident que le degré relative est égale à 1 ( $r = 1$ ) (on rappelle que  $r$  c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour que la commande apparaisse) . alors la surface de *slotine* sera :

$$S = e = y - y_r = x_1 - y_r \quad (4.12)$$

Pour étudier la convergence, on définit la variable  $S_\phi$  :

$$S_\phi = S - \phi \cdot \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (4.13)$$

Le signal  $S_\phi(t)$  a les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{S}_\phi(t) &= S_\phi(t) = 0 \quad \text{si} \quad |S(t)| \leq \phi \\ \dot{S}_\phi(t) &= \dot{S}(t), |S_\phi(t)| = |S(t)| - \phi \quad \text{si} \quad |S(t)| > \phi \end{aligned}$$

#### 4.4.2 Conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement

##### A - Approche de Lyapounov :

On définit la fonction de Lyapounov :

$$V_1(S_\phi) = \frac{1}{2} S_\phi^2$$

Donc :

$$\dot{V}_1(S_\phi) = S_\phi \dot{S}_\phi$$

- \* si  $|S| < \phi$  alors  $\dot{S}_\phi = S_\phi = 0$  et  $\dot{V}_1 = 0$ .
- \* si  $|S| > \phi$  alors  $\dot{S}_\phi = \dot{S}$  et  $\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) = \text{sign}(S) = \text{sign}(S_\phi)$ .

On aura alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= S_\phi \dot{x}_1 = S_\phi [-p_2 x_1 + p_2 x_{\frac{N}{2}+1} + \frac{u}{A_f \Delta_l} (-x_1 + x_2 + \xi_1(x(t)))] \\ &= S_\phi [f(x, t) + (g(x, t) + \xi_1(x(t)))u]. \end{aligned} \quad (4.14)$$

#### 4.4.3 Établissement de la loi de commande

On introduit maintenant la loi de commande :

$$u = \frac{1}{g(x, t)} (-f(x, t) - K \cdot \text{sign}(S_\phi)) = u_{eq} + u_r \quad (4.15)$$

Remplaçant dans  $\dot{V}_1$  :

$$\dot{V}_1 = S_\phi [f(x, t) + (g(x, t) + \xi_1(x(t))) \frac{1}{g(x, t)} (-f(x, t) - K \cdot \text{sign}(S_\phi))] \quad (4.16)$$

Après le développement de cette equation on obtiendra la condition de convergence suivante :

$$K \geq \sup \left| \frac{\xi_1(x(t)) \cdot u_{eq}}{1 + \frac{\xi_1(x(t))}{g(x, t)}} \right| \quad (4.17)$$

On aura :

$$K \geq \frac{M_1 |u_{eq}|}{1 - \frac{M_1}{|g(x, t)|}} \quad (4.18)$$

Avec :  $\frac{M_1}{|g(x, t)|} \ll 1$  et  $u_{eq}$  bornée.

Par conséquent :

$$\dot{V}_1 = S_\phi \dot{S}_\phi \leq -\gamma |S_\phi| \quad \text{Avec : } \gamma > 0.$$

Par le théorème de Lyapounov,  $S_\phi$  tend asymptotiquement vers 0 ce qui nous donnera asymptotiquement l'inégalité :

$$|S| < \phi \quad \text{donc} \quad |e| < \phi \quad (4.19)$$

## 4.5 Simulation

### 4.5.1 Système incertain

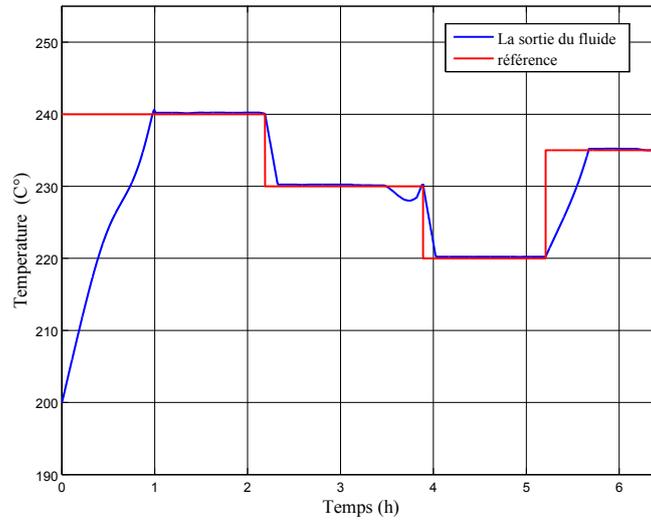


FIGURE 4.4 – Résultat de la poursuite de référence

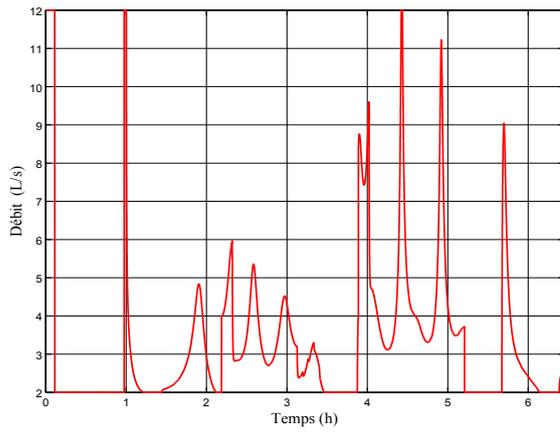


FIGURE 4.5 – La variation de commande

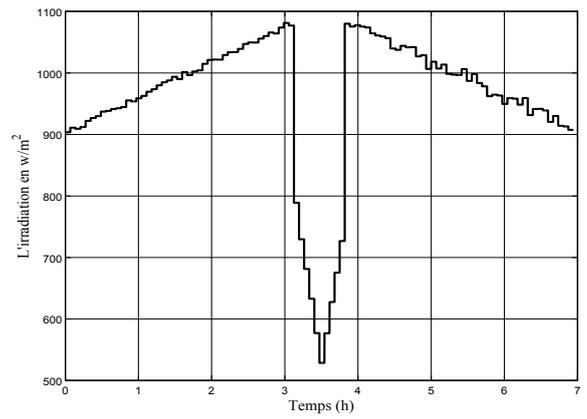


FIGURE 4.6 – L'irradiation solaire

## 4.5.2 Système parfait

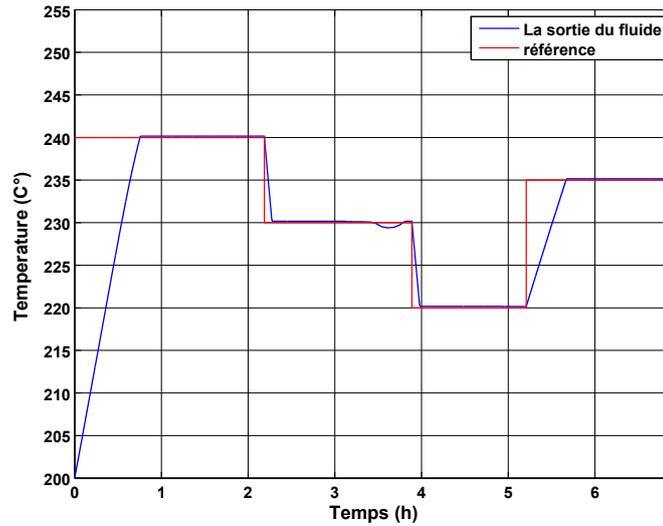


FIGURE 4.7 – Résultat de la poursuite de référence

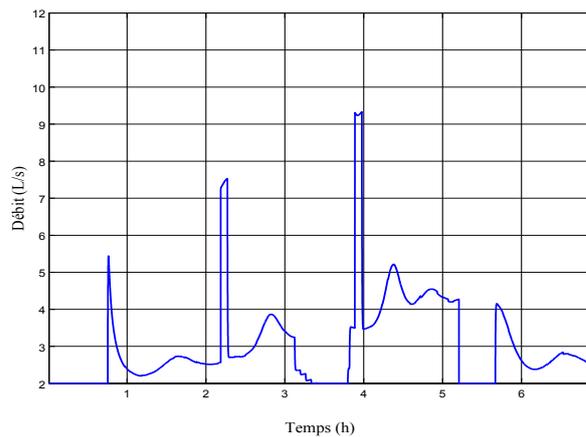


FIGURE 4.8 – La variation de commande

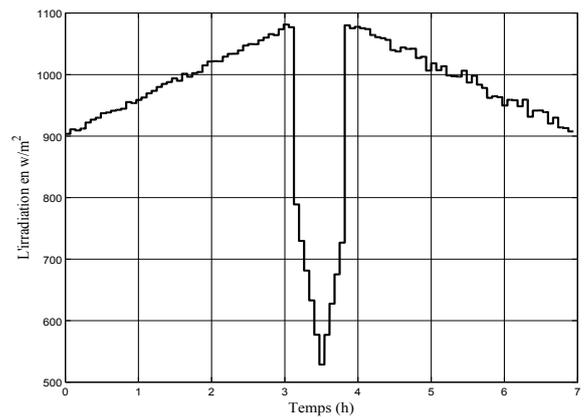


FIGURE 4.9 – L'irradiation solaire

On peut voir dans la fig(4.7) où on n'a pas une erreur de troncature qu'on atteint tous les points de fonctionnement, tel que si la référence diminue soudainement (ex : 1.7 h), le débit est augmenté à une grande valeur afin de réduire la température de fluide, Ce dernier est alors forcé à suivre la référence.

Respectivement, si la valeur de référence augmente, le débit est diminué au minimum (ex : 5,5 heure ), ce changement est effectués afin de forcer la température du fluide de sortir pour converger au point de consigne. On a aussi observé que la commande par mode glissant nous permet d'avoir des performances intéressantes en régime transitoire et en termes de précision.

Après qu'on atteint la surface de glissement, on reste sur cette surface pourtant que l'installation est sous l'effet des nuages partielles ce qui est interprétée par la diminution des radiations (entre 3.1 h et 3.8 h), mais la commande réagit immédiatement par diminution de débit de la même façon de diminution d'irradiation, ce qui compense cette perturbation et nous assure de rester sur la surface (robustesse vis-à-vis les perturbation extérieurs).

On voit dans la fig (4.4) que cette commande est aussi robuste vis-à-vis les erreurs de modélisation et possède les même caractéristiques comme le premier cas, avec une seule différence c'est que l'organe de commande ( la pompe ) souffre des grandes oscillations, ça peut être interprété par la dépendance de l'erreur aux états comme il est aussi multiplié par la commande pourtant que cette erreur est bornée. ce qui crée des dynamiques supplémentaires dans les équations d'état forcent la commande à chaque fois de se changer et les compenser pour assurer la convergence .

## 4.6 Tests de robustesse

Les mêmes tests de robustesses vus au chapitre II sont refaits pour pouvoir tester les performances de la commande par mode glissant utilisée pour le système incertain puis pour le système parfait.

### 4.6.1 Système incertain

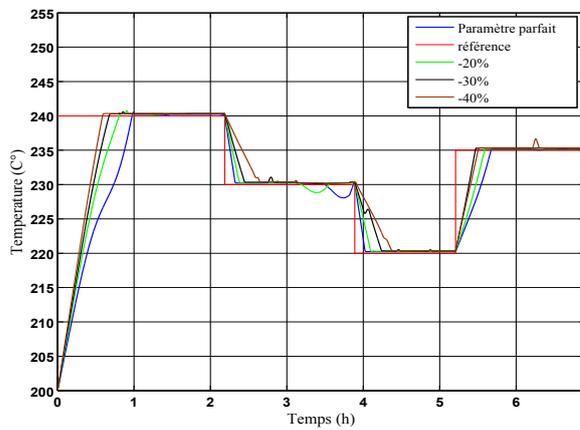


FIGURE 4.10 – résultats avec la variation de  $H_l$  et  $\rho_f$

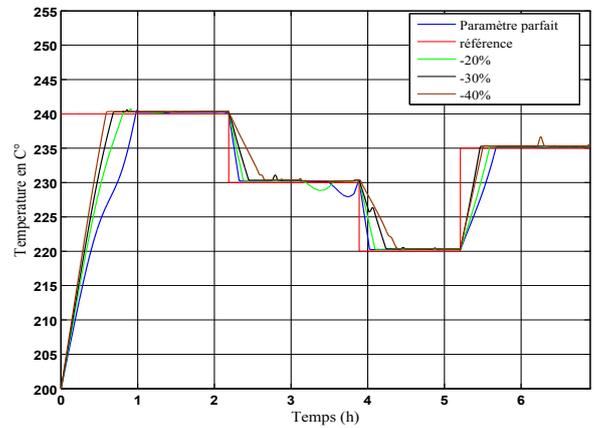


FIGURE 4.11 – résultats avec la variation de  $H_t$  et  $C_f$

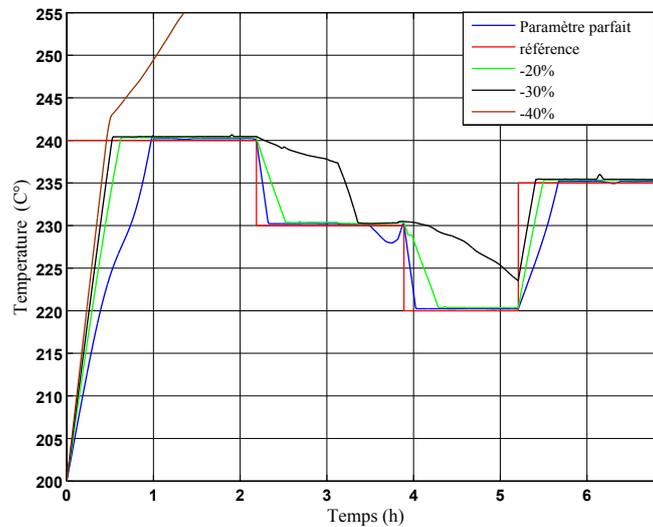


FIGURE 4.12 – résultats avec la variation des quatre paramètres du fluide

### 4.6.2 Système parfait

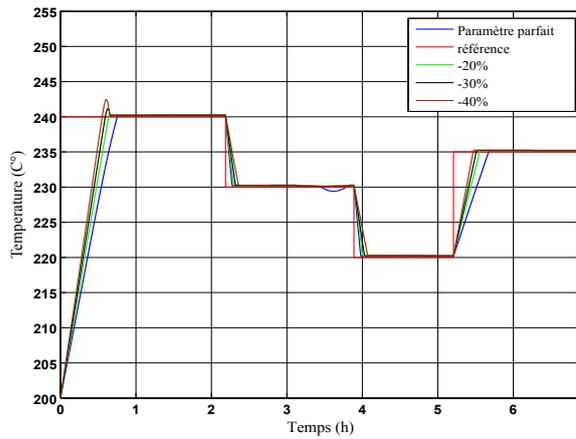


FIGURE 4.13 – résultats avec la variation de  $H_l$  et  $\rho_f$

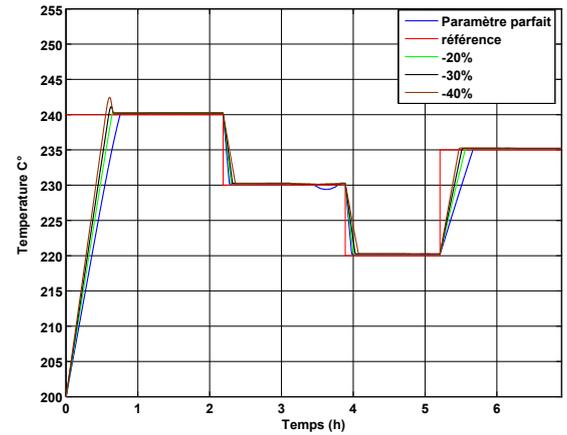


FIGURE 4.14 – résultats avec la variation de  $H_t$  et  $C_f$

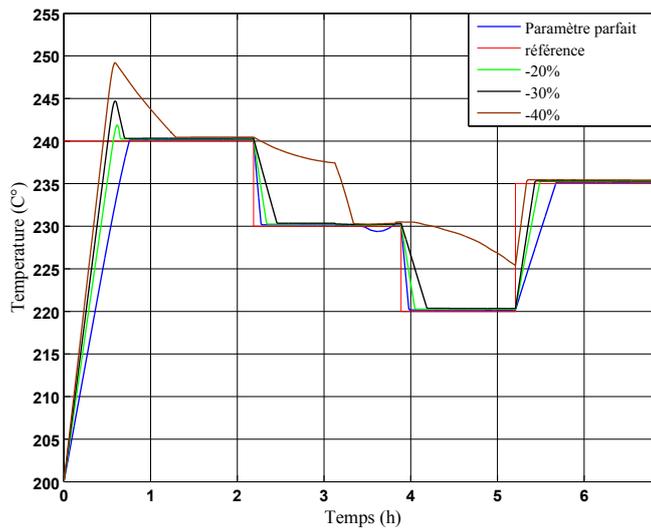


FIGURE 4.15 – résultats avec la variation des paramètres du fluide

On a fait des changements paramétriques de - 20%, - 30% et - 40% sur les paramètres du fluide indiqués ci-dessus, les résultats sont donnée sur les deux figures.

Malgré le changement des paramètres du fluide, les figures montrent que le système suit la référence dans le régime permanent, mais dans le régime transitoire un petit dépassement dans la réponse est remarquable, à partir de 40 % de variation paramétrique ; la réponse diverge.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de régulation par mode de glissement, les résultats obtenus montrent les avantages de ce type de régulateur surtout sa robustesse, d'un coté par rapport à la variation de la radiation solaire et aux changements paramétriques, et d'autre coté par rapport aux erreurs de troncature.

On a vu que cette commande utilise toute sa force pour réaliser les objectives. Cela apparaît lors d'un changement de la température de référence, alors le débit atteint le seuil. Cette commande réagit avec l'existence des erreurs par l'augmentation ou la diminution pour compenser ces variations qui peuvent créer des vibrations dans le fonctionnement de l'organe de commande (la pompe). Notons que nous avons montré la convergence de l'erreur de poursuite dans une bande de saturation.

Une conclusion importante est tiré à partir de cette étude, que la commande par mode glissant est plus performante par rapport à la commande  $H_\infty$ , pourtant qu'il manque des informations nécessaires sur les états du système qui ne sont malheureusement pas mesurables, ce problème peut être résolu en construisant des observateurs d'état dans les chapitres suivants.

# Chapitre IV

---

Estimation des températures

Par l'observateur

À grand gains

## Chapitre 5

# Estimation des températures par l'observateur à grand gains

### 5.1 Introduction

Les Installations solaires sont affectées par plusieurs sources de perturbations telles que les variations quotidiennes des radiations, des changements d'efficacité globale en raison de l'accumulation de la poussière sur les collecteurs, des changements dans la température à l'entrée, etc...

Le pyrliometer est un capteur d'irradiation solaire produit seulement une mesure locale d'irradiation. L'extrapolation de cette mesure locale au reste du champ solaire peut être une hypothèse raisonnable quand la longueur de boucle et la taille du champ solaire sont petites, au contraire, ce capteur peut être aussi influencé par les nuages, ou il mesure des valeurs d'irradiations locales totalement différentes aux autres points du reste du champ, et vice versa, ce qui génère des erreurs d'approximation du modèle et influence sur le régulateur et sur le bon fonctionnement de toute la centrale, d'un autre point de vu, il coûte cher, il est aussi difficile à placer des capteurs dans tout le champ solaire qui contient 10 boucles, et chacune divisée par 15 (des autres techniques de contrôle [6] devisent la boucle en 100 ). Ces deux contraintes, nous dirigent vers l'implémentation des capteurs logicielles qui utilisent des algorithmes basées sur un modèle de connaissance et un certain nombre des mesures en ligne issues des capteurs physiques qui donnent une information précise sur l'évolution du procédé. c'est ce qu'on appelle l'observation ou l'estimation, qui est généralement utilisée dans l'industrie avec l'existence des obstacles technique et financiers.

Dans ce chapitre, on va baser sur l'un des nouvelles approches d'estimation, c'est l'observateur à grand gain, son caractéristique principale réside dans la facilité de son implémentation et de son réglage assurée à l'aide d'un seul paramètre.

### 5.2 Les observateurs d'état

Un observateur ou reconstituteur d'état est un système dynamique qui permet d'obtenir une estimation de la valeur courante de l'état non mesuré d'un système à partir des informations antérieures sur les entrées et la sortie de ce dernier.

Ces observateurs sont appliquées sur **les systèmes linéaires** et **les systèmes non linéaires**, on cite par la suite les fameux observateurs appliquées sur les deux types.

### 5.2.1 Observateur linéaire

#### A - Systèmes linéaires stationnaires

Soit le système linéaire stationnaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{cases} \quad (5.1)$$

où :  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^1$  et A,B et C sont des matrices constantes de dimensions appropriées.

Et soit le système suivant :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(C\hat{x} - y) \quad (5.2)$$

où la matrice K est choisie telle que les valeurs propres de ( A - KC ) sont à parties réelles négatives.

Ce système est un observateur exponentiel pour le système 5.2, communément appelé par le nom de son auteur i.e. **observateur de Luenberger**.

#### B - Systèmes linéaires temps variant : filtre de Kalman . [41]

Soit le système linéaire temps variant suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) \end{cases} \quad (5.3)$$

où :  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^1$  et A,B et C sont des matrices constantes de dimensions appropriées.

Les observateurs de Kalman prennent la forme suivante tel qu'on utilise une équation dynamique de Riccati pour le gain ) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= A(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t) - R^{-1}(t)C^T(t)(C(t)\hat{x} - y(t)) \\ \dot{R}(t) &= -RQR - A^T(t)R(t) - R(t)A(t) + C^T(t)C(t) \\ R(0) &= R_0 \\ Q(0) &= Q_0 \end{cases} \quad (5.4)$$

$R_0, Q_0$  étant deux matrices définies positives.

La convergence de cet observateur est garantie sous l'hypothèse de l'uniforme complète observabilité du système.

Dans ce type de synthèse, il faut assurer non seulement la stabilité de l'équation d'erreur, mais aussi celle de la matrice de gain R, elle doit être symétrique définie positive et bornée pour tout t.

### 5.2.2 Observateur non linéaire

Contrairement aux systèmes linéaires, qui sont observables indépendamment de l'entrée  $u(t)$  et ayant un concept global, les systèmes non linéaires, ne possèdent pas ces caractéristiques.

En général, les systèmes non linéaires ont des entrées du singularité qui les rendent non observables, par conséquent, l'observation devient plus difficile.

Le système non linéaire est décrit par le modèle suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x(t), u) \\ y &= h(x(t)) \end{cases} \quad (5.5)$$

où :

$x \in R^n$  représente le vecteur d'état.

$u \in R^m$  est le vecteur d'entrée ou la commande.

$y \in R^p$  dénote le vecteur de sortie.

### 5.2.3 Définitions théoriques

Pour comprendre la notion d'observabilité dans le cas non linéaire, on doit tout d'abord savoir quelques notions et définitions fondamentales :

#### Définition 1 : Distinguabilité - Indistinguabilité [41]

Étant donnée l'espace d'état  $V$  et l'ensemble  $U$  des entrées, deux états initiaux  $x_0, x_1 \in V$  tel que  $x_0 \neq x_1$  sont dits distinguables dans  $V$  si :  $\exists t \geq 0$  et  $\exists u : [0, t] \rightarrow U$  une entrée admissible telle que les trajectoires des sorties issues respectivement de  $x_0$  et  $x_1$  restent dans  $V$  pendant la durée  $[0, t]$  et vérifient  $y(t, x_0, u(t)) \neq y(t, x_1, u(t))$ . Dans ce cas, on dira que  $u$  distingue  $x_0$  et  $x_1$  dans  $V$ .

Réciproquement, deux états initiaux  $x_0, x_1 \in V$  tel que  $x_0 \neq x_1$  sont dits indistinguables si  $\forall t \geq 0$  et  $\forall u : [0, t] \rightarrow U$  pour lesquels les trajectoires issues de  $x_0, x_1$  restent dans  $V$  on a :  $y(t, x_0, u(t)) = y(t, x_1, u(t))$ .

#### Définition 2 : Observabilité et Observabilité locale faible

\* Un système est observable en  $x_0 \in V$  si tout autre état  $x_1 \neq x_0$  est distinguables de  $x_0$  dans  $V$ .

\* Un système est observable s'il est observable en tout point  $x_0 \in V$ .

\* Le système est localement faiblement observable en  $x_0 \in V$ , s'il existe un voisinage ouvert  $V'(x_0) \subset V$  contenant  $x_0$ , tel que pour tout voisinage  $V'' \subset V'(x_0)$  de  $x_0$ , pour tout point  $x_1 \in V''(x_0)$ , les couples  $(x_0, x_1)$  sont distinguables et les trajectoires  $x(t, x_0, u(t))$  et  $x(t, x_1, u(t))$  évoluent à l'intérieur de  $V''(x_0)$ .

#### Définition 3 : Entrée universelle [35] [21]

Une entrée  $u : [0, T] \rightarrow U$  admissible est dite universelle pour un système sur  $[0, T]$  si, pour tout couple d'états initiaux distincts  $x_0$  et  $x_1$ , et lorsque le système est excité par  $u$  il existe au moins un temps  $t \in [0, T]$  tel que  $y(t, x_0, u(t)) \neq y(t, x_1, u(t))$ , une entrée non universelle est dite singulière.

#### Définition 4 : U - uniforme observabilité

Un système dont toutes les entrées admissibles à valeur dans  $U$  sont universelles est dit U-uniformément observable.

Dans le cas où l'ensemble de toutes les entrées à valeurs bornées dans  $R^m$  sont universelles, ce système sera dit  $R^m$  - uniformément observable (et l'on dira par la suite seulement uniformément observable).

## 5.3 Types d'observateur non linéaire

La synthèse d'observateur non linéaire n'est pas systématique, elle dépend de sa structure et des points de fonctionnement, généralement il aspire sa philosophie à partir des observateurs linéaires, il y a plusieurs travaux sur les observateurs non linéaires, on cite les plus connus et les plus utilisées :

### 5.3.1 Filtre de Kalman Étendu (EKF)

Le filtre de Kalman étendu est un extension de filtre de Kalman linéaire en system non linéaire, tel qu'on linéarise le système autour du point actuel  $\hat{x}(t)$ , donc ; on trouve les matrices  $A, B$  et  $C$ , puis on développe le filtre de Kalman linéaire, qui exige la solution en ligne de deux equations : l'équation différentielle de Riccati et une autre différentielle linéaire d'observations.

L'observation par le filtre de Kalman étendu, est une méthode locale telle que les preuves de stabilité et de convergence établis dans le cas des systèmes linéaires ne peuvent pas être étendus de manière générale au cas des systèmes non linéaires.

Sous certaines conditions, l'estimation converge vers le vrai état, si l'erreur de l'estimation initiale n'est pas trop grande. La stabilité est difficile à garantir et dépend souvent de sa bonne initiation. Il est parfois difficile de distinguer entre les problèmes numériques liés à la résolution de ces équations et les problèmes de sensibilité qui sont liés aux problèmes de mesures et à la structure du modèle (notion d'observabilité).

### 5.3.2 Observateurs à mode glissant

Le principe des observateurs par mode glissant consiste à contraindre, à l'aide des fonctions discontinues, les dynamiques d'un système d'ordre  $n$  à converger vers une variété  $S$  de dimension  $(n - p)$  dite surface de glissement ( $p$  étant la dimension du vecteur de mesure)[9].

L'observateur à mode glissant est défini avec la structure suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= f(\hat{x}, u) - K.sign(\hat{y} - y) \\ \hat{y} &= h(\hat{x}) \end{cases} \quad (5.6)$$

où :  $K$  est la matrice de gain de dimension  $(n - p)$ .

### 5.3.3 Observateur de Luenberger étendu

L'observateur de Luenberger étendu intervient, soit au niveau du système original avec un gain constant, soit par le biais d'un changement de coordonnées avec un gain dépendant de l'état à estimer.

Dans le premier cas, un modèle linéarisé est nécessaire, et le gain de l'observateur est calculé par placement de pôles. Ce type d'observateur ne peut être utilisé que lorsque on est sûr que l'état restera au voisinage de l'état d'équilibre. Pour cette raison, l'utilisation de cet observateur peut être compromise par les instabilités qui peuvent se révéler si l'on s'éloigne du point de fonctionnement. Dans le deuxième cas, les méthodes de changement de coordonnées ne concernent qu'une classe restreinte de systèmes non linéaires. [9]

En effet, beaucoup d'approches utilisant les changements de coordonnées nécessitent l'intégration d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires, ce qui est souvent très délicat à réaliser. De ce fait, l'utilisation de solutions approchées est envisageable.

### 5.3.4 Observateur à grand gains

Les observateurs à grand gain sont des observateurs non linéaires qui prennent en compte la non stationnarité et la non linéarité des procédés industriels et qui assurent, en même temps, une bonne estimation de l'état réel avec un réglage aisé du vecteur gain.[25] [37] [32] Ils ont été introduits en premier lieu, par Gauthier dans [22].

La démonstration théorique de convergence d'observateur à grand gain est basée sur la résolution de l'équation algébrique de Lyapounov, ce qu'on va voir dans la suite de ce travail.

La construction de cet observateur base seulement sur un seul degré de liberté appelé  $\varepsilon$  permet de faire un compromis entre la rapidité et la robustesse vis-à-vis le bruit, ce qui est considéré comme un inconvénient d'un côté (un seul paramètre pour régler le compromis ne suffit pas à avoir des bons résultats) et comme un avantage d'un autre (la minimisation des paramètres facilite le travail, et on aura un seul paramètre pour étudier le compromis), il existe plusieurs travaux qui étudient ce compromis [1] [16] [4].

## 5.4 Observation station solaire

Les travaux sur l'observation des station solaire sont rares, dans [17] l'auteur utilise UKF (Uncented Kalman Filtre) qui est une approximation de l'EKF.

Dans [18] l'auteur utilise des techniques des Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) tel que le gain de l'observateur est obtenu en résolvant un problème des inégalités matricielles et par la suite, l'observateur existe si ce système des LMI(s) admet une solution.

Dans ce qui suit, nous allons développer un observateur à grand gain qui ne nécessite pas beaucoup de calcul et qui peut converger exponentiellement.

## 5.5 Observateur à grand gain pour les systèmes non linéaire

Avant faire toute synthèse d'observation il faut vérifier que le système est observable, dans [21] l'auteur donne une condition pour que le système soit observable quelque soit l'entrée (uniformément observable), c'est quand le système soit sous la forme triangulaire (la jacobienne est une matrice triangulaire inférieur) c'est notre cas avec une petite déférence, on montre dans la suite - malgré l'existence de cette différence - qu'on a un système uniformément observable.

### 5.5.1 Synthèse d'observateur

Soit le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_1 x(t) + \varphi(x(t), u(t)) + \xi(x(t), u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5.7)$$

Où l'état  $x(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{\frac{N}{2}} \end{pmatrix} \in R^{\frac{N}{2}}$ , la sortie  $y(t) \in R$  et la commande  $u \in R$

La matrice  $A_1$  est de dimension  $\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$  ( on veut estimer la température du fluide, alors on ne prend que les  $\frac{N}{2}$  premiers termes du vecteur  $x$  ) et soit :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & p_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & & & p_3 \\ 0 & \cdots & & & 0 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Et soit le vecteur  $\varphi(x(t), u(t)) :$

$$\varphi(x(t), u(t)) = \begin{pmatrix} p_4 x_1 + p_2 x_{\frac{N}{2}+1} \\ p_4 x_2 + p_2 x_{\frac{N}{2}+2} \\ \vdots \\ p_4 x_{\frac{N}{2}-1} + p_2 x_{N-1} \\ p_4 x_{\frac{N}{2}} + p_2 x_N + \frac{qT_{in}}{A_f \Delta l} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

La matrice  $C$  est de la forme :

$$C = [ 1 \ 0 \ \cdots \ 0 ] \quad (5.10)$$

L'observateur à grands gains de ce système prend la forme suivante :

$$\dot{\hat{x}} = A_1 \hat{x} + \varphi(u, \hat{x}(t)) + \frac{1}{\varepsilon} \Delta_\varepsilon^{-1} S^{-1} C^T (y - C \hat{x}) \quad (5.11)$$

Où :

- $\varepsilon \leq 1$  est le paramètre de réglage de l'observateur.
- $S$  est l'unique solution de l'équation algébrique de Lyapounov :  $S + A_1^T S + S A_1 - C^T C = 0$ .
- $\Delta_\varepsilon$  est la matrice diagonale :

$$\Delta_\varepsilon = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^{\frac{N}{2}-1} \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

## 5.5.2 Hypothèses de synthèse

### Hypothèse 1

Sachant que l'observabilité en N.L dépend de la commande  $u$  ( contrairement au cas linéaire ), alors le système doit être uniformément observable, c.à.d, on aura l'observabilité  $\forall u$ . C'est une hypothèse classique dans la synthèses d'observation.

### Hypothèse 2

L'entrée  $u(t)$  est bornée. Plus précisément, nous avons  $u(t) \in U$  pour tout  $t \geq 0$  où  $U$  est un compact respectivement de  $R$  supposée continue et bornée, c'est à dire :  $u(t) \in U \subset R$  ou :

$$U = \{u : t \rightarrow R \mid \forall t \in R^+, u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}\} \quad (5.13)$$

Cette hypothèse est toujours vérifié pour notre système tell que le débit est compris entre 2 L/s et 12 L/s.

$$2L/s \leq q = u \leq 12L/s \quad (5.14)$$

les deux limite ont été prises afin de respecter :

- \* le débit maximale due aux limitations de la capacité de la pompe ( 12 L/s )
- \* La limite de sécurité ( 2 L/s )

### Hypothèse 3

On suppose la fonction  $\varphi(x(t), u(t))$  est globalement Lipschitzienne par rapport à  $x(t)$ , uniformément en  $u(t)$ .

Si  $\varphi(x(t), u(t))$  est globalement lipschitzienne (ou au moins localement lipschitzienne continu dans une certaine région d'intérêt) ça nous permet de dominer l'effet des non-linéarités car on ne peut pas dominer cette effet par l'augmentation des gains. l'intérêt de cette hypothèse va apparaître dans la démonstration de convergence de l'observateur.

## 5.5.3 Vérification des hypothèses sur notre système :

### 1- L'observabilité uniforme :

D'après la définition de l'observabilité uniforme, pour toute entrée  $u : [0 \ T] \rightarrow U$  et pour toutes conditions initiales :  $x \neq x'$ , il existe  $t \in [0 \ T]$  tell que  $y(x, u, t) \neq y(x', u, t)$ . où  $y(x, u, t)$  est la sortie à l'instant  $t$ ; associée à l'entrée  $u$  et à la condition initiale  $x$  tell que  $x(t) = [x_1(t) \ \cdots \ x_N(t)]$

Dans notre système la sortie mesurée est la première composante de l'état, donc, il faut montrer que :

- 1- si  $x \neq x' \implies \exists t \quad tq : y(x, u, t) \neq y(x', u, t)$  .  
 2- ou :  $y(x, u, t) = y(x', u, t) \implies x = x' \forall t \in [0 \quad T]$  .

Comme on a :  $x_1 = y(x, u, t)$  et  $x'_1 = y(x', u, t)$ . on vérifie avec la deuxième implication : donc  $y(x, u, t) = y(x', u, t) \implies x_1 = x'_1$  .

En dérivant  $x_1$  et  $x'_1$  par rapport au temps (  $\forall t \in [0 \quad T]$  ) on obtient :

$$p_3x_2 + p_4x_1 + p_2x_{\frac{N}{2}+1} + \frac{u_1}{A_f\Delta_l} = p_3x'_2 + p_4x'_1 + p_2x'_{\frac{N}{2}+1} + \frac{u_1}{A_f\Delta_l} \quad (5.15)$$

Alors :

$$p_3x_2 + p_2x_{\frac{N}{2}+1} = p_3x'_2 + p_2x'_{\frac{N}{2}+1} \quad (5.16)$$

On utilise le raisonnement par l'absurde : supposons  $x_{\frac{N}{2}+1} \neq x'_{\frac{N}{2}+1}$ , on pose  $x_{\frac{N}{2}-1} = c_1$  et  $x'_{\frac{N}{2}-1} = 2c_1$  avec :  $c_1 = \text{constante}$ .

On dérive par rapport au temps, on trouve :

$$p_0x_{\frac{N}{2}+1} + p_1x_1 + \frac{I_{rr}G}{A_mC_m\rho_m} + \frac{T_aHl}{A_mC_m\rho_m} = 0 \quad (5.17)$$

$$p_0x'_{\frac{N}{2}+1} + p_1x'_1 + \frac{I_{rr}G}{A_mC_m\rho_m} + \frac{T_aHl}{A_mC_m\rho_m} = 0 \quad (5.18)$$

Donc :

$$p_0x_{\frac{N}{2}+1} = p_0x'_{\frac{N}{2}+1} \quad (5.19)$$

C'est une contradiction avec la proposition. on conclue que :  $x_{\frac{N}{2}+1} = x'_{\frac{N}{2}+1}$  . on remplace ce résultat dans (5.15), on obtient :  $x_2 = x'_2$ .

idem pour les autres états, on trouve à la fin que :  $y(x, u, t) = y(x', u, t) \implies x = x'$  . le système sera observable pour toute entrée : le système est uniformément observable.

## 2- globalement lipschitzienne :

### théorème

une fonction  $f(t, x)$  est globalement Lipschitzienne en  $x$  si :

$$\| f(\check{x}(t), u(t)) - f(x(t), u(t)) \| \leq L \| \check{x} - x \| \quad (5.20)$$

Pour tout  $x$  et  $\check{x} \in R^n$  avec la même constante de Lipschitz  $L$ ,  $f(t, x)$  est globalement Lipschitzienne en  $x$  ssi les dérivées partielles (  $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$  ) sont continue globalement et bornée dans le temps  $t$ .

### Pour notre modèle :

1-démontrer que  $\varphi(x, u)$  est lipschitzienne

soit :

$$\varphi(x, u) = [\varphi_1(x, u), \varphi_2(x, u), \dots, \varphi_{\frac{N}{2}}(x, u)] \quad (5.21)$$

On a :

$$\varphi_1(x, u) = p_4x_1 + p_2x_{\frac{N}{2}+1} = \left( -\frac{\delta_p H_t}{\rho_f A_f C_f} - \frac{u}{A_f \Delta_l} \right) x_1 + \frac{\delta_p H_t}{\rho_f A_f C_f} x_{\frac{N}{2}+1}$$

$$= \left[ \frac{\delta_p 0.00249 \left( \frac{x_1 + T_{in}}{2} \right)}{(903 - 0.672x_1)(1820 + 3.478x_1)A_f} - \frac{u}{A_f \Delta_l} \right] x_1 + \left[ \frac{\delta_p 0.00249 \left( \frac{x_1 + T_{in}}{2} \right)}{(903 - 0.672x_1)(1820 + 3.478x_1)A_f} \right] x_{\frac{N}{2}+1}$$

Il est clair que  $\frac{\partial \varphi_1(x, u)}{\partial x_1}$  et  $\frac{\partial \varphi_1(x, u)}{\partial x_{\frac{N}{2}+1}}$  sont des fonctions continues et bornées dans un domaines d'intérêt, donc  $\varphi_1(x, u)$  est lipschitzienne. Idem pour les  $\varphi_i(x, u)$ .

2-comme  $\varphi(x, u)$  est lipschitzienne :

$\exists L_i > 0, \forall u \in \Omega, \forall \hat{x}_i, x_i \in X \in R^N$  Telle que :

$$\| (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(\hat{x}(t), u)) \| \leq \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} | \varphi_i(x(t), u(t)) - \varphi_i(\hat{x}(t), u) | \quad (5.22)$$

comme :

$$| \varphi_1(x(t), u(t)) - \varphi_1(\hat{x}(t), u) | \leq l_1 | x_1 - \hat{x}_1 | + l_{\frac{N}{2}+1} | x_{\frac{N}{2}+1} - \hat{x}_{\frac{N}{2}+1} | = L_1 | x_1 - \hat{x}_1 | \quad (5.23)$$

Tel que :  $L_1 = l_1 + l_{\frac{N}{2}+1} \frac{| x_{\frac{N}{2}+1} - \hat{x}_{\frac{N}{2}+1} |}{| x_1 - \hat{x}_1 |}$

De même, on a :

$$\begin{aligned} | \varphi_2(x(t), u(t)) - \varphi_2(\hat{x}(t), u) | &\leq L_2 | x_2 - \hat{x}_2 | \\ &\vdots \\ | \varphi_{\frac{N}{2}}(x(t), u(t)) - \varphi_{\frac{N}{2}}(\hat{x}(t), u) | &\leq L_{\frac{N}{2}} | x_{\frac{N}{2}} - \hat{x}_{\frac{N}{2}} | \end{aligned}$$

Donc :

$$\| (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(\hat{x}(t), u)) \| \leq \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} | \varphi_i(x(t), u(t)) - \varphi_i(\hat{x}(t), u) | \leq \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} L_i | x_i - \hat{x}_i | \leq \frac{N}{2} L \| x - \hat{x} \| \quad , L = \sup(L_i).$$

Tel que :  $x, \hat{x} \in R^{\frac{N}{2}}$  (c'est à dire qu'on prend seulement les états qui concernent le fluide et ceux sont les composantes du vecteur d'état de la fonction de Lyapounov ),

Cette hypothèse est restrictive par son caractère global. Toutefois, en pratique, la trajectoire du système (physique) reste généralement confinée dans un domaine compact bornée (  $\delta \in R^N$  ) sur lequel les non linéarités sont lipschitziennes (l'état reste bornée, car la température d'huile ne peut pas dépasser certaines limites dans notre environnement, c'est à cause des limites des radiations et des limites de débit,... en plus la variation de température a une valeur fini ).

### 5.5.4 Synthèse de convergence globale ( observateur / commande )

Soit l'erreur d'observation :

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (5.24)$$

On dérive par rapport au temps :

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = A_1 \tilde{x} + \varphi(x(t), u(t)) - \varphi(u, \hat{x}(t)) - \frac{1}{\varepsilon} \Delta_\varepsilon^{-1} S^{-1} C^T (y - C\hat{x}) + \xi(x(t), u) \quad (5.25)$$

Nous introduisons maintenant le changement de variable suivant :

$$\bar{x} = \Delta_\varepsilon \tilde{x} \quad (5.26)$$

Ce qui donne :

$$\Delta_\varepsilon A_1 \Delta_\varepsilon^{-1} = \frac{1}{\varepsilon} A_1, \quad C \Delta_\varepsilon^{-1} = C. \quad (5.27)$$

En remplaçant dans l'équation (5.25), on obtient :

$$\dot{\tilde{x}} = \frac{1}{\varepsilon} A_1 \bar{x} - \frac{1}{\varepsilon} S^{-1} C^T C \bar{x} + \Delta_\varepsilon (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(u, \hat{x}(t))) + \Delta_\varepsilon \xi(x(t), u) \quad (5.28)$$

Pour démontrer la convergence globale de la commande et de l'observateur, on définit la fonction de Lyapounov suivante :

$$V : \mathbb{R}^{\frac{N}{2}} \longrightarrow \mathbb{R}$$

$$V(\bar{x}, S_\phi) = \frac{1}{2} S_\phi^2 + \bar{x}^T S \bar{x} = V_1 + V_2$$

Alors :

$$\dot{V}(\bar{x}, S_\phi) = S_\phi \dot{S}_\phi + 2\bar{x}^T S \dot{\bar{x}} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$$

On prend :

$$\dot{V}_1 = S_\phi \dot{S}_\phi \quad (5.29)$$

La démonstration de la convergence de cette fonction de Lyapounov a été faite au chapitre III sans observation d'état, dans cette partie on va refaire la démonstration de la convergence de l'erreur de poursuite par la commande par mode de glissement à base d'observateur à grands gains.

On a alors pour les deux cas suivants :

- \* si  $|S| < \varphi$  alors  $\dot{S}_\phi = S_\phi = 0$  et  $\dot{V} = 0$
- \* si  $|S| > \varphi$  alors  $\dot{S}_\phi = \dot{S}$  et  $\text{sat}(\frac{S}{\varphi}) = \text{sign}(S) = \text{sign}(S_\phi)$ .

On aura alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= S_\phi \dot{x}_1 = S_\phi [-p_2 x_1 + p_2 x_{\frac{N}{2}+1} + \frac{u}{A_f \Delta_l} (-x_1 + x_2 + \xi_1(x(t)))] \\ &= S_\phi [f(x, t) + (g(x, t) + \xi_1(x(t)))u]. \end{aligned} \quad (5.30)$$

Pour étudier la stabilité théorique de la commande, on écrit l'équation de  $\dot{x}_1$  sous la forme :

$$\dot{x}_1 = f(\hat{x}, t) + \Delta f(\hat{x}, t) + (g(\hat{x}, t) + \Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t)))u \quad (5.31)$$

Avec :

$$\begin{cases} |\Delta f(\hat{x}, t)| < m_1 & (I) \\ |\Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t))| < m_2 & (II) \end{cases}$$

Tel que  $m_1$  et  $m_2$  sont deux constantes caractérisent les bornes supérieures des erreurs d'estimation de  $f(x, t)$  et  $(g(x, t) + \xi_1(x(t)))$  respectivement.

En remplaçant dans l'équation de  $\dot{V}_1$ , on obtient :

$$\dot{V}_1 = S_\phi [f(\hat{x}, t) + \Delta f(\hat{x}, t) + \{g(\hat{x}, t) + \Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t))\}u] \quad (5.32)$$

On introduit maintenant la loi de commande :

$$u = \frac{1}{g(\hat{x}, t)} (-f(\hat{x}, t) - K \cdot \text{sign}(S_\phi)) = u_{eq} + u_r \quad (5.33)$$

Remplaçant dans  $\dot{V}_1$  :

$$\dot{V}_1 = S_\phi [f(\hat{x}, t) + \Delta f(\hat{x}, t) + (g(\hat{x}, t) + \Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t))) \frac{1}{g(\hat{x}, t)} (-f(\hat{x}, t) - K \cdot \text{sign}(S_\phi))] ]$$

Après le développement de cette equation on obtiendra la condition de convergence suivante :

$$K \geq \sup \left| \frac{\Delta f(\hat{x}, t) + (\Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t))) u_{eq}}{1 + \frac{\Delta g(\hat{x}, t) + \xi_1(x(t))}{g(\hat{x}, t)}} \right| \quad (5.34)$$

Avec (I) et (II) on aura :

$$K \geq \frac{m_1 + m_2 |u_{eq}|}{1 - \frac{m_2}{|g(\hat{x}, t)|}} \quad (5.35)$$

Tel que :  $\frac{m_2}{|g(\hat{x}, t)|} \ll 1$  et  $u_{eq}$  bornée.

Par conséquent :

$$\dot{V}_1 = S_\phi \dot{S}_\phi \leq -\gamma |S_\phi| \quad \text{Avec : } \gamma > 0.$$

Par le théorème de Lyapounov,  $S_\phi$  tend asymptotiquement vers 0 ce qui nous donnera asymptotiquement l'inégalité :

$$|S| < \phi \quad \text{donc} \quad |e| < \phi \quad (5.36)$$

d'un autre coté :

$$\dot{V}_2 = 2\bar{x}^T S \dot{\bar{x}} = \frac{2}{\varepsilon} \bar{x}^T S A_1 \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon (\varphi(x, u) - \varphi(\hat{x}, u)) - \frac{2}{\varepsilon} \bar{x}^T C^T C \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon \xi(x(t), u) \quad (5.37)$$

Comme :  $A_1^T S + S A_1 = C^T C - S$ , et comme  $\frac{2}{\varepsilon} \bar{x}^T S A_1 \bar{x}$  est un scalaire, alors :

$$\frac{2}{\varepsilon} \bar{x}^T S A_1 \bar{x} = \frac{1}{\varepsilon} \bar{x}^T (A_1^T S + S A_1) \bar{x} = \frac{1}{\varepsilon} \bar{x}^T (C^T C - S) \bar{x} \quad (5.38)$$

Donc :

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{\varepsilon} V_2 + \frac{1}{\varepsilon} \bar{x}^T C^T C \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(u, \hat{x}(t))) - \frac{2}{\varepsilon} \bar{x}^T C^T C \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon \xi(x(t), u) \\ &= -\frac{1}{\varepsilon} V_2 - \frac{1}{\varepsilon} \bar{x}^T C^T C \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(u, \hat{x}(t))) + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon \xi(x(t), u) \\ &\leq -\frac{1}{\varepsilon} V_2 + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(u, \hat{x}(t))) + 2\bar{x}^T S \Delta_\varepsilon \xi(x(t), u) \end{aligned}$$

D'après l'hypothèse 2 :

$$\begin{aligned} \|\Delta_\varepsilon (\varphi(x(t), u(t)) - \varphi(\hat{x}(t), u))\| &\leq \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} |\varepsilon^{i-1} (\varphi_i(x(t), u(t)) - \varphi_i(\hat{x}(t), u))| \\ &\leq \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} L |\varepsilon^{i-1} \tilde{x}_i| \leq \frac{N}{2} L \|\Delta_\varepsilon \tilde{x}\| = \frac{N}{2} L \|\bar{x}\| = \alpha \|\bar{x}\|. \end{aligned} \quad (5.39)$$

Où :  $L = \max L_i$ , et  $\alpha$  est une constante positive indépendante de  $\varepsilon$ .

On a aussi :

$$\lambda_{\min}(S) \cdot \|\bar{x}\|^2 \leq \bar{x}^T S \bar{x} \leq \lambda_{\max}(S) \cdot \|\bar{x}\|^2 \quad (5.40)$$

$\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$  représentent respectivement la plus petite ( grande) valeur propre de  $S$ .

Donc :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\frac{1}{\varepsilon} V_2 + 2\alpha \lambda_{\max}(S) \|\bar{x}\|^2 + 2\lambda_{\max}(S) \|\bar{x}\| \|\Delta_\varepsilon \xi(x(t), u)\| \\ &\leq -\frac{1}{\varepsilon} V_2 + 2\alpha \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} V_2 + 2\lambda_{\max}(S) \|\bar{x}\| \|\Delta_\varepsilon \xi(x(t), u)\| \\ &\leq -\frac{1}{\varepsilon} V_2 + 2\alpha \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} V_2 + 2 \frac{\lambda_{\max}(S)}{\sqrt{\lambda_{\min}(S)}} \sqrt{V_2} \sqrt{\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \frac{M_k^2}{\varepsilon^{-2(k-1)}}} \\ &\leq -\left(\frac{1}{\varepsilon} - c\right) V_2 + 2P(\varepsilon) \sqrt{V_2} \end{aligned} \quad (5.41)$$

$$\text{pour : } c = 2\alpha \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad \text{et} \quad P(\varepsilon) = \frac{\lambda_{\max}(S)}{\sqrt{\lambda_{\min}(S)}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \frac{M_k^2}{\varepsilon^{-2(k-1)}}$$

La résolution de cette equation différentielle nous donne :

$$\begin{aligned} \sqrt{V_2(\bar{x}(t))} &\leq e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t} \sqrt{V_2(\bar{x}(0))} + \frac{2}{\frac{1}{\varepsilon}-c} P(\varepsilon) (1 - e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t}) \\ &\leq e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t} \sqrt{V_2(\bar{x}(0))} + \frac{2}{\frac{1}{\varepsilon}-c} P(\varepsilon) \end{aligned} \quad (5.42)$$

Ce qui implique :

$$\|\bar{x}(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)}} e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t} \|\bar{x}(0)\| + \frac{2}{\sqrt{\lambda_{\min}(s)}(\frac{1}{\varepsilon}-c)} P(\varepsilon) \quad (5.43)$$

Revenons maintenant à l'erreur originale  $\tilde{x}$  : ( $\bar{x} = \Delta_\varepsilon \tilde{x}$ ). On aura :

$$\|\bar{x}\| \leq \|\tilde{x}\| \leq \frac{1}{\varepsilon^{\frac{N}{2}-1}} \|\bar{x}\| \quad (5.44)$$

Donc l'inégalité devient :

$$\|\tilde{x}(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)}} \frac{1}{\varepsilon^{\frac{N}{2}-1}} e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t} \|\tilde{x}(0)\| + \frac{\frac{2}{\varepsilon^{\frac{N}{2}-1}}}{\sqrt{\lambda_{\min}(s)}(\frac{1}{\varepsilon}-c)} P(\varepsilon) \quad (5.45)$$

Pour avoir la convergence de l'erreur d'estimation, il suffit de prendre  $\frac{1}{\varepsilon} > c$ .

Soit  $\rho$  :

$$\rho = \sup_{\frac{1}{\varepsilon} \geq 1} \frac{\frac{2}{\varepsilon^{\frac{N}{2}-1}}}{\sqrt{\lambda_{\min}(s)}(\frac{1}{\varepsilon}-c)} P(\varepsilon) \quad (5.46)$$

d'après 5.35 et 5.45 On a :

$$\|\tilde{x}(t)\| + |S| \leq \frac{\sqrt{c}}{\varepsilon^{\frac{N}{2}-1} \sqrt{2\alpha}} e^{-\frac{\frac{1}{\varepsilon}-c}{2}t} \|\tilde{x}(0)\| + \rho + \phi \quad (5.47)$$

On voit bien que l'erreur globale d'estimation et de poursuite reste dans une boule dont le rayon est égale à  $(\rho + \phi)$ .

## 5.6 Simulation

### 5.6.1 Système incertain

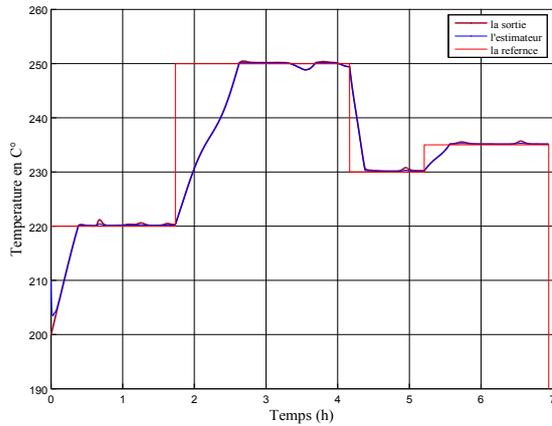


FIGURE 5.1 – Résultats de la poursuite de référence

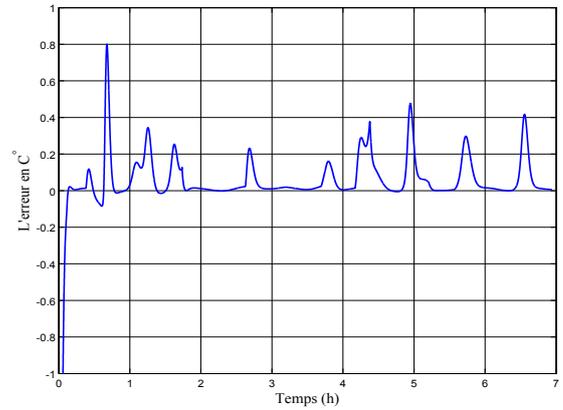


FIGURE 5.2 – L'erreur d'estimation sur la sortie

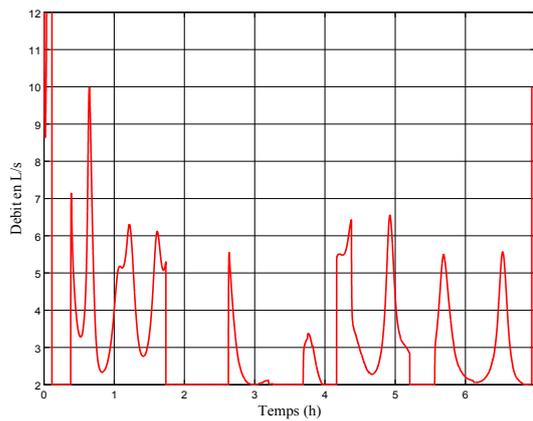


FIGURE 5.3 – La variation de commande

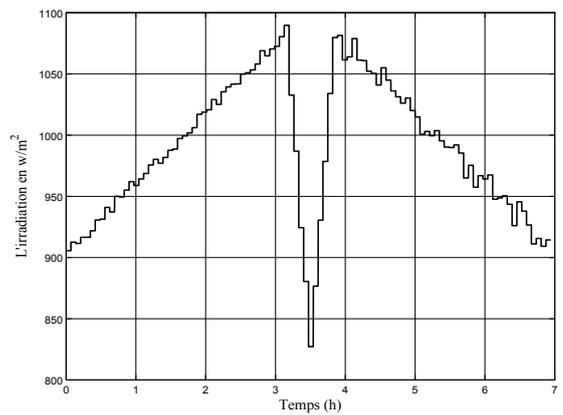


FIGURE 5.4 – L'irradiation solaire

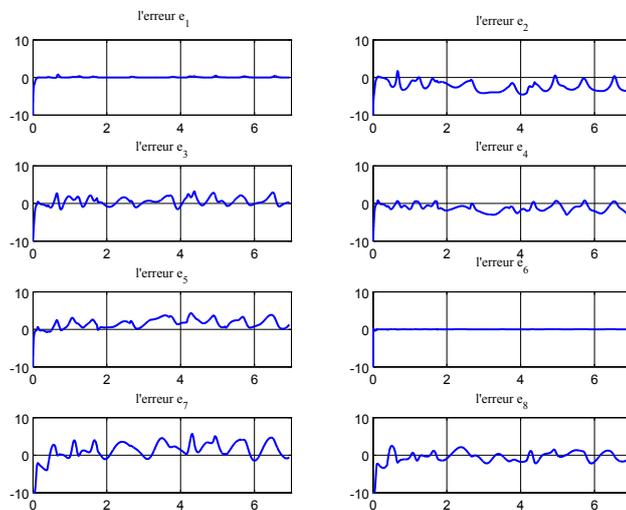


FIGURE 5.5 – Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états

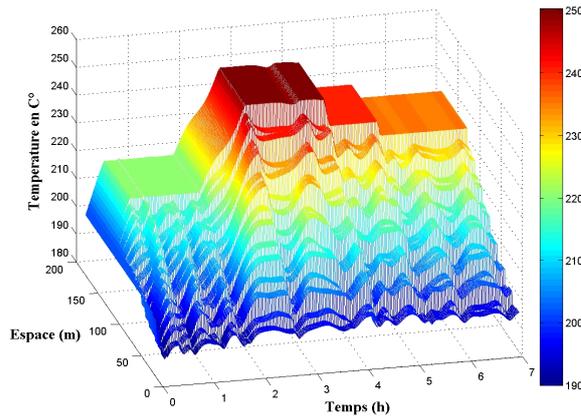


FIGURE 5.6 – La variation de la température au cours du tube

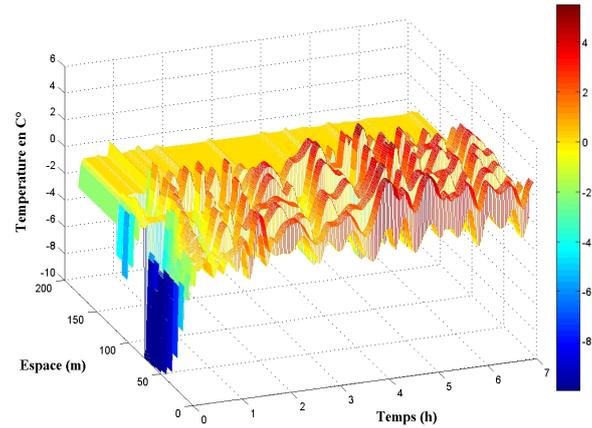


FIGURE 5.7 – L'erreur d'observation au cours du tube

On remarque que la commande par mode glissant à base d'observateur à grande gain nous donne des très bons résultats tel que, on atteint toutes les références ( fig 5.1 ), malgré l'existence des perturbations dans les radiations solaires et de l'erreur de troncature, et on voit que le débit réagit de la même façon expliquée dans le chapitre III .

La figure 5.5 , montre les 8 premiers erreurs d'estimation, et la fig 5.7 montre tous les erreurs d'estimation au long du tube. On voit bien que ces erreurs ne convergent pas exactement vers zero, mais elles restent varier dans un domaine de rayons  $4\text{ C}^\circ$  par simulation, ce qui confirme l'étude de la section ( 5.5.4).

### 5.6.2 Système parfait

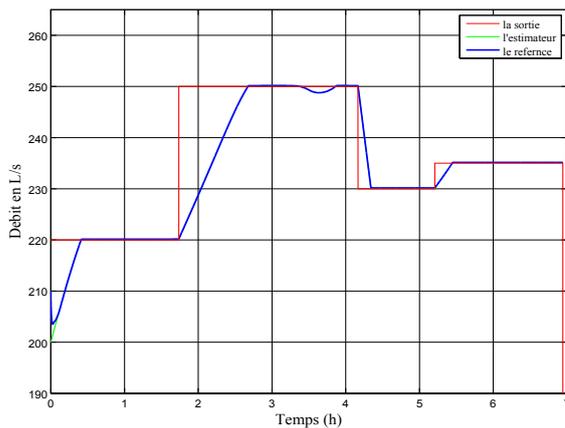


FIGURE 5.8 – Résultats de la poursuite de référence

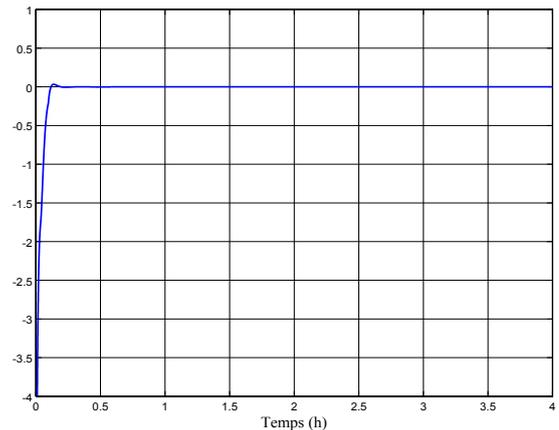


FIGURE 5.9 – L'erreur d'estimation sur la sortie

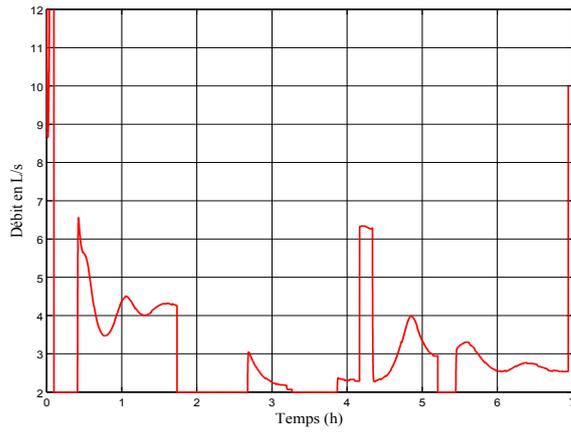


FIGURE 5.10 – La variation de commande

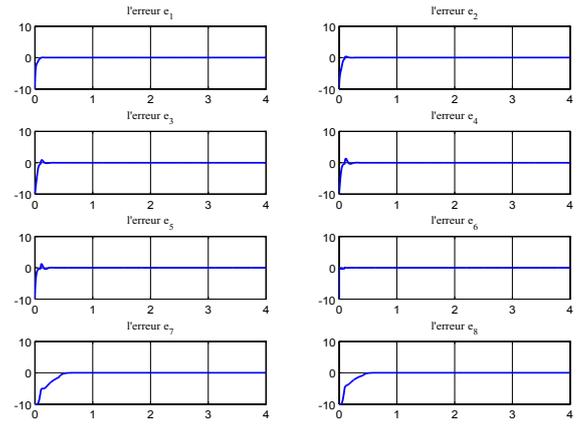


FIGURE 5.11 – Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états

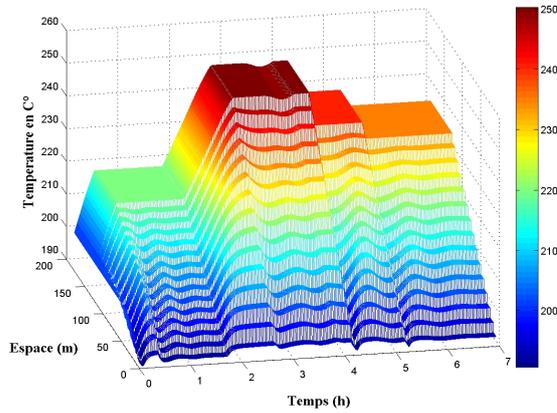


FIGURE 5.12 – La variation de la température au cours du tube

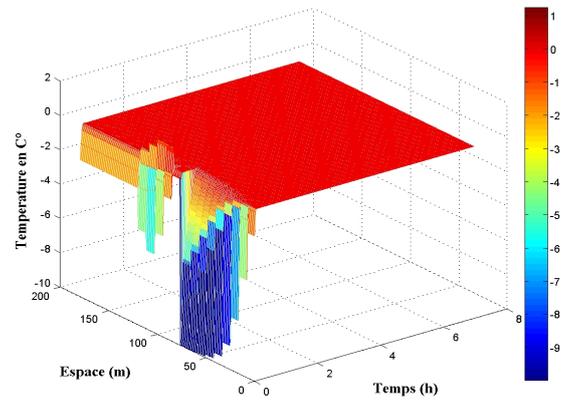


FIGURE 5.13 – L'erreur d'observation au cours du tube

Nous voyons qu'en absence des erreurs de discrétisation, les erreurs de poursuite et d'estimation sont presque nulles avec un débit ( la commande) moins oscillatoire.

## 5.7 Tests de robustesse

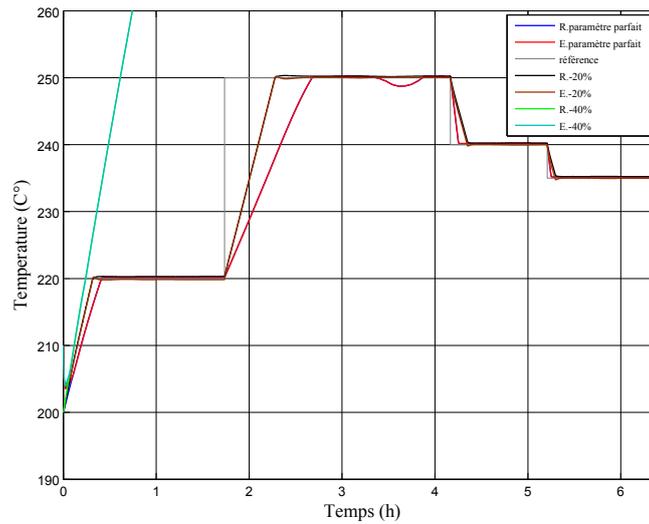


FIGURE 5.14 – résultats avec la variation des quatre paramètres du fluide pour le système incertain

on remarque que la commande par mode glissant synthétisée via l'observateur à grand gains est robuste par rapport aux variations paramétriques jusqu'à une variation maximal - 40% où les deux réponses réelle et estimée divergent.

## 5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donnés des rappelles théoriques sur les observateurs d'état (on a précisé les raisons pour lesquelles nous avons besoin des observateurs au début du chapitre) pour les systèmes linéaires et non linéaires, puis on a introduit l'observateur à grande gain pour assurer une estimation de l'état réel avec un réglage aisé du vecteur gain, et on a donné les hypothèses exigées pour l'utilisation de cet observateur, finalement on l'a vérifiée sur notre système, en terminant par une démonstration globale de stabilité en utilisant la fonction de Lyapounov, suivie par des simulations et des tests de robustesse, qui confirment la stabilité de l'erreur de poursuite et d'estimation du système incertain dans une boule de rayon maximal de 4 C°, c'est un résultat très acceptable.

# Chapitre V

---

Estimation des températures

Par l'observateur À

Mode glissant

## Chapitre 6

# Estimation des températures par mode de glissement

### 6.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a parlé de l'observateur à grands gains qui donnait des bons résultats d'estimation des températures du système avec une commande qui réalise une poursuite performante, alors dans ce chapitre, on vient de vérifier ces résultats en appliquant un autre observateur de même type qui est basé sur l'idée d'introduire des termes de corrections, c'est l'observateur par mode glissant. En utilisant cet observateur, on pourra comparer les résultats obtenus précédemment et vérifier la robustesse de l'observateur à grand gains avec la commande par mode glissant.

Dans cette section, nous rappelons brièvement la synthèse d'un observateur par modes glissants basé sur la forme d'injection d'entrée triangulaire.

### 6.2 Observateur classique par modes glissants

Les principes de bases de l'observation par mode glissant consistent aux contraintes de la dynamique du système d'ordre " n " envers ( n - p ) surface dimensionnelle, référée comme la surface de glissement. " p " est la dimension du vecteur des mesures. L'attraction de cette surface est garantie par les conditions spécifiées qu'on appelle **les conditions de glissement**. Dans ce cas, elles vérifient la convergence du système vers la surface de glissement et varient en fonction de la dynamique d'ordre ( n - p ) .

Dans ce cas de l'observation par mode glissant, les dynamiques d'intérêt sont celles de l'erreur d'observation (  $\tilde{x} = \hat{x} - x$  ). ces erreurs convergent de leurs valeurs initiales  $\tilde{x} = 0$  vers le point d'équilibre en fonction de deux étapes :

\* Premièrement, les trajectoires de ces erreurs sont forcées à aller vers la surface de glissement ou l'erreur entre la sortie de l'observateur et la sortie du système réel (  $\tilde{x} = \hat{x} - x$  ) est nulle. Cette étape est référée comme le mode atteint et il est généralement fortement dynamique.

\* Deuxièmement, les trajectoires des erreurs d'observations glissent sur les surfaces de glissement avec une dynamique imposée afin d'annuler le reste de l'erreur. Cette étape est appelée " le mode de glissement " .

Ainsi, pour les systèmes non linéaires, tels que la station que nous Étudierons, de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{cases} \quad (6.1)$$

une structure d'observateur par modes glissants s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} &= \hat{x}(x, u) + \Lambda \text{sign}(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{y}} &= \hat{h}(\hat{x}) \end{cases} \quad (6.2)$$

c'est une copie du modèle, à laquelle on ajoute un terme correcteur, qui assure la convergence de  $\hat{x}$  vers  $x$ . La surface de glissement dans ce cas est donnée par :

$$S(x) = y - \hat{y} \quad (6.3)$$

Le terme de correction utilisé est proportionnel à la fonction discontinue signe appliquée à l'erreur de sortie ou  $\text{sign}(x)$  est définie par :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

L'étude de stabilité et de convergence pour de tels observateurs, est basée sur l'utilisation des fonctions de Lyapounov.[31]

### 6.2.1 Observateur triangulaire par modes glissants

Une autre structure d'observateurs basée sur les modes glissants, à été introduite dans plusieurs travaux. Cet observateur a été développé pour des systèmes qui peuvent se mettre sous la forme suivante, appelée forme triangulaire d'observation :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 + g_1(x_1, u) \\ x_3 + g_2(x_1, x_2, u) \\ \vdots \\ x_n + g_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, u) \\ f_n(x) + g_n(x, u) \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

ou les  $g_i$  et  $f_n$  pour  $i = 1, \dots, n$  sont des fonctions analytiques,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$  l'état du système,  $u \in R^m$  est le vecteur d'entrée et  $y \in R$  la sortie que nous considérons pour des raisons de simplicité d'écriture unidimensionnelle.

La structure de l'observateur proposée est la suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1} \\ \dot{\hat{x}}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_2 + g_1(x_1, u) + \lambda_1 \text{sign}_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_3 + g_2(x_1, \bar{x}_2, u) + \lambda_2 \text{sign}_2(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \vdots \\ \hat{x}_n + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}, u) + \lambda_{n-1} \text{sign}_{n-1}(\bar{x}_{n-1} - \hat{x}_{n-1}) \\ f_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u) + \lambda_n \text{sign}_n(\bar{x}_n - \hat{x}_n) \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

ou les variables  $\bar{x}_i$  sont données par :

$$\bar{x}_i = \hat{x}_i + \lambda_{i-1} \text{sign}_{moy,i-1}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \quad (6.7)$$

Avec,  $\text{sign}_{moy,i-1}$  désignant la fonction  $\text{sign}_{i-1}$  filtrée par un filtre passe-bas, la fonction  $\text{sign}_i(\cdot)$  est mise à zéro s'il existe  $j \in 1, i$  tel que  $\bar{x}_j - \hat{x}_j \neq 0$  ( par définition :  $\bar{x}_1 = x_1$  ), sinon,  $\text{sign}_i(\cdot)$  est prise égale à la fonction  $\text{sign}$  classique. Grâce à cela, nous imposons que le terme correcteur ne soit " actif " que si la condition  $\bar{x}_j - \hat{x}_j = 0$  pour  $j = 1, \dots, i$  est vérifié.

L'avantage de cet observateur, par rapport à l'observateur classique par modes glissants présenté ci-dessus, est sa convergence en temps fini (par étapes) de l'erreur d'observation. Il permet la séparation de la synthèse de l'observateur et de la commande, facilitant ainsi l'étude de stabilité en boucle fermée. [13]

### 6.3 Application de l'observateur à mode de glissement

Le modèle vu au chapitre 1 peut s'écrire sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \dot{x}_1 & = & p_3x_2 + p_4x_1 + p_2x_{\frac{N}{2}+1} = f_1(x_1, x_2, x_{\frac{N}{2}+1}) \\ \dot{x}_2 & = & p_3x_3 + p_4x_2 + p_2x_{\frac{N}{2}+2} = f_2(x_2, x_3, x_{\frac{N}{2}+2}) \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}} & = & p_4x_{\frac{N}{2}} + p_2x_N + \frac{qT_{in}}{A_f\Delta l} = f_{\frac{N}{2}}(x_{\frac{N}{2}}, x_N) \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}+1} & = & p_0x_{\frac{N}{2}+1} + p_1x_1 + \frac{GI_{eff}}{\rho_m G_m A_m} + \frac{GH_l T_a}{\rho_m G_m A_m} = f_{\frac{N}{2}+1}(x_1, x_{\frac{N}{2}+1}) \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}+2} & = & p_0x_{\frac{N}{2}+2} + p_1x_2 + \frac{GI_{eff}}{\rho_m G_m A_m} + \frac{GH_l T_a}{\rho_m G_m A_m} = f_{\frac{N}{2}+2}(x_2, x_{\frac{N}{2}+2}) \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_N & = & p_0x_N + p_1x_{\frac{N}{2}} + \frac{GI_{eff}}{\rho_m G_m A_m} + \frac{GH_l T_a}{\rho_m G_m A_m} = f_N(x_{\frac{N}{2}}, x_N) \end{array} \right. \quad (6.8)$$

La structure de l'observateur proposée s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \dot{\hat{x}}_1 & = & \hat{f}_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_{\frac{N}{2}+1}) + \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 & = & \hat{f}_2(\hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_{\frac{N}{2}+2}) + \lambda_2 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{\frac{N}{2}} & = & \hat{f}_{\frac{N}{2}}(\hat{x}_{\frac{N}{2}}, \hat{x}_N) + \lambda_{\frac{N}{2}} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_{\frac{N}{2}+1} & = & \hat{f}_{\frac{N}{2}+1}(\hat{x}_1, \hat{x}_{\frac{N}{2}+1}) + \lambda_{\frac{N}{2}+1} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_{\frac{N}{2}+2} & = & \hat{f}_{\frac{N}{2}+2}(\hat{x}_2, \hat{x}_{\frac{N}{2}+2}) + \lambda_{\frac{N}{2}+2} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{\hat{x}}_N & = & \hat{f}_N(\hat{x}_{\frac{N}{2}}, \hat{x}_N) + \lambda_N \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \end{array} \right. \quad (6.9)$$

On prend la surface de glissement suivante :

$$S = y - \hat{y} = x_1 - \hat{x}_1 = e_1 \quad (6.10)$$

Et soit l'erreur d'observation :

$$e = x - \hat{x} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - \hat{x}_1 \\ x_2 - \hat{x}_2 \\ \vdots \\ x_N - \hat{x}_N \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

La dynamique de cette erreur d'observation s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \dot{e}_1 & = & \Delta f_1 - \lambda_1 \text{sign}(e_1) \\ \dot{e}_2 & = & \Delta f_2 - \lambda_2 \text{sign}(e_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{e}_N & = & \Delta f_N - \lambda_N \text{sign}(e_1) \end{array} \right. \quad (6.12)$$

Avec :

$$\Delta f_i = f_i - \hat{f}_i \quad (6.13)$$

#### 6.3.1 Condition d'attractivité

On considère la fonction de Lyapounov :

$$V_1 = \frac{1}{2}S^2 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (6.14)$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 \\ &= e_1(\Delta f_1 - \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1))\end{aligned}\quad (6.15)$$

Pour que  $\dot{V}_1$  soit négative :  $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 < 0$  soit :

$$e_1(\Delta f_1 - \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1)) < 0 \implies \lambda_1 > |\Delta f_1| \quad (6.16)$$

Donc :

$$\lambda_1 = |p_3 \hat{x}_2| + \max(p_3 x_2) + |\hat{p}_4 \hat{x}_1| + \max(p_4 x_1) + |\hat{p}_2 \hat{x}_{\frac{N}{2}+1}| + \max(p_2 x_{\frac{N}{2}+1}) \quad (6.17)$$

### 6.3.2 Surface de glissement

On a :

$$e_1 = \dot{e}_1 = 0 \quad (6.18)$$

Soit la fonction de Lyapounov :

$$V_{\frac{N}{2}+1} = \frac{1}{2} e_{\frac{N}{2}+1}^2 \quad (6.19)$$

Donc :

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\frac{N}{2}+1} &= e_{\frac{N}{2}+1} \dot{e}_{\frac{N}{2}+1} \\ &= e_{\frac{N}{2}+1}(\Delta f_{\frac{N}{2}+1} - L_{\frac{N}{2}+1} \text{sign}(e_1))\end{aligned}$$

Sachant que :  $x_{\frac{N}{2}+1}$  est la température du métal du premier segment, et  $x_1$  est la température du fluide du premier segment. on peut supposer que :

$$\text{sign}(e_1) = \text{sign}(e_{\frac{N}{2}+1})$$

Alors :

La condition de convergence est :

$$\dot{V}_{\frac{N}{2}+1} < 0 \quad \text{on refait les etapes precedentes, donc : } L_{\frac{N}{2}+1} > |\Delta f_{\frac{N}{2}+1}|_{\max}$$

Á partir de  $V_1 \implies e_1 \rightarrow 0$ , Á partir de  $V_{\frac{N}{2}+1} \implies e_{\frac{N}{2}+1} \rightarrow 0$

On reprend  $\dot{e}_1$  sur la surface de glissement :

$$\dot{e}_1 = (p_3 x_2 + p_2 x_1 + p_2 x_{\frac{N}{2}+1}) - (p_3 \hat{x}_1 + \hat{p}_2 \hat{x}_1 + \hat{p}_2 \hat{x}_{\frac{N}{2}+1} + L_1 \text{sign}(e_1))$$

Sachant que :

$$p_2 = \frac{\delta_p H_t}{\rho_f C_f A_f} \quad \text{est une fonction de } x_1 \text{ alors : } p_2 \rightarrow \hat{p}_2 \quad \text{pour } x_1 \rightarrow \hat{x}_1$$

$$\dot{e}_1 \simeq p_3 e_2 - L_1 \text{sign}(e_1) = 0$$

On conclue que :

$$\text{sign}(e_2) = \text{sign}(e_1)$$

On refait toutes les étapes précédentes, en utilisant ce résultat, pour trouver les valeurs des gains.

De même, on trouve :

$$\lambda_i > |\Delta f_i| \quad (6.20)$$

## 6.4 Résultats de simulation

### 6.4.1 Système incertain

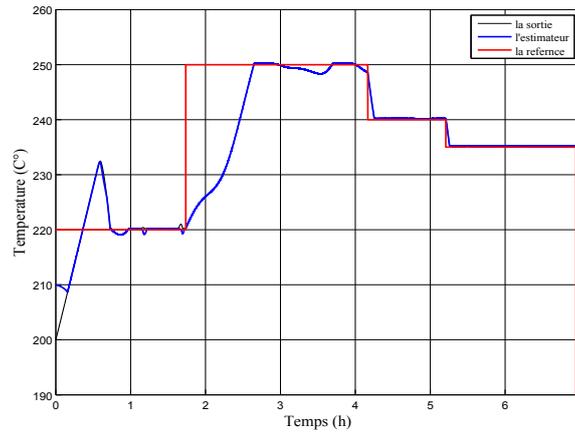


FIGURE 6.1 – Résultat de la poursuite de référence

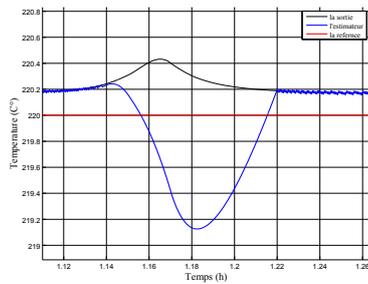


FIGURE 6.2 – Zoom 1 sur la réponse

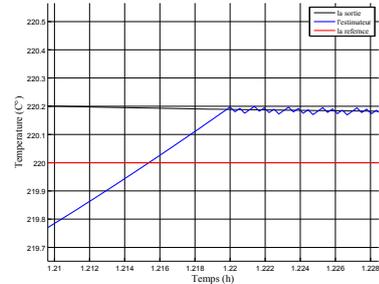


FIGURE 6.3 – Zoom 2 sur la réponse

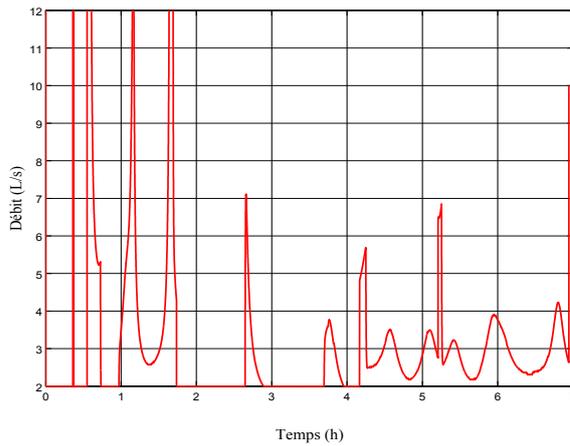


FIGURE 6.4 – La variation de commande

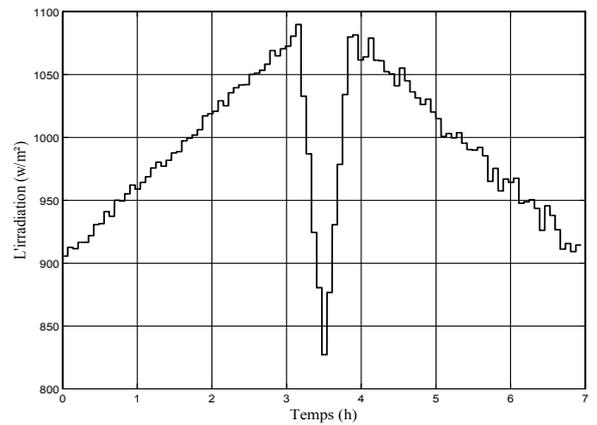


FIGURE 6.5 – L'irradiation solaire

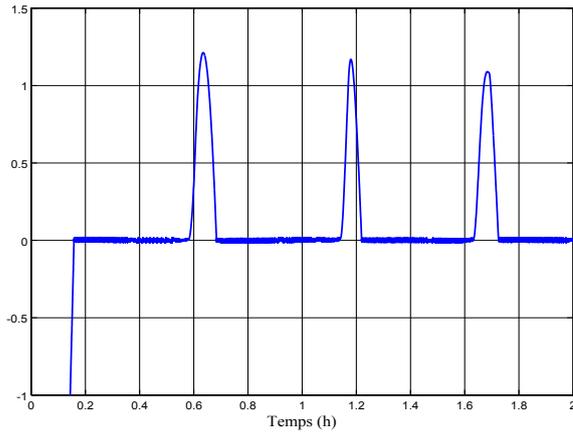


FIGURE 6.6 – l’erreur d’estimation à la sortie

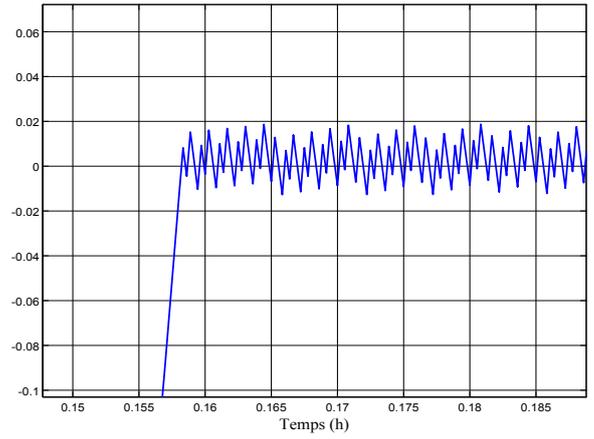


FIGURE 6.7 – Zoom sur l’erreur d’estimation à la sortie

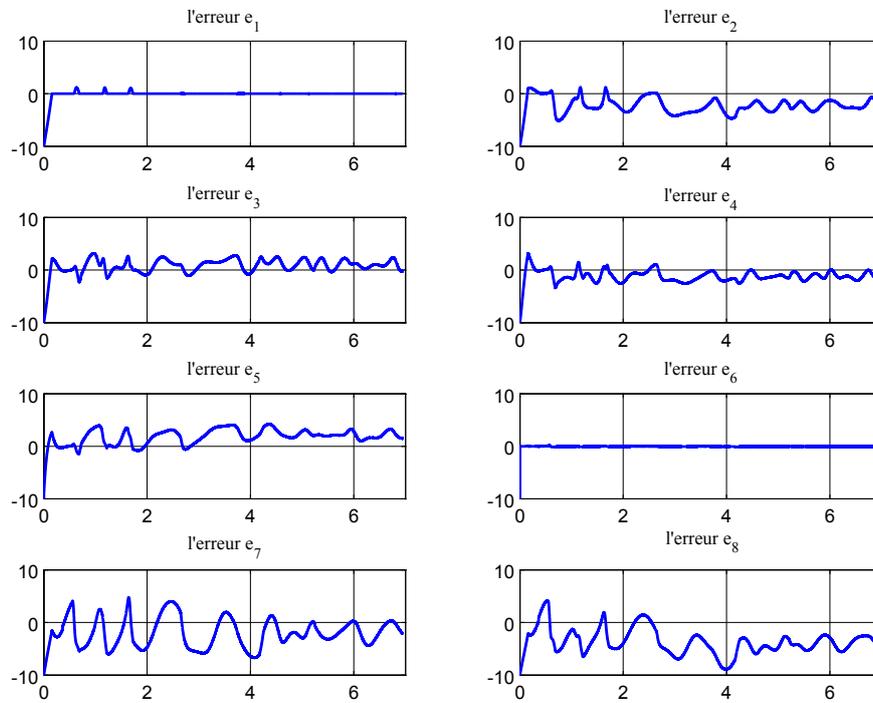


FIGURE 6.8 – Les 8 premiers erreurs d’estimations

### 6.4.2 Système parfait

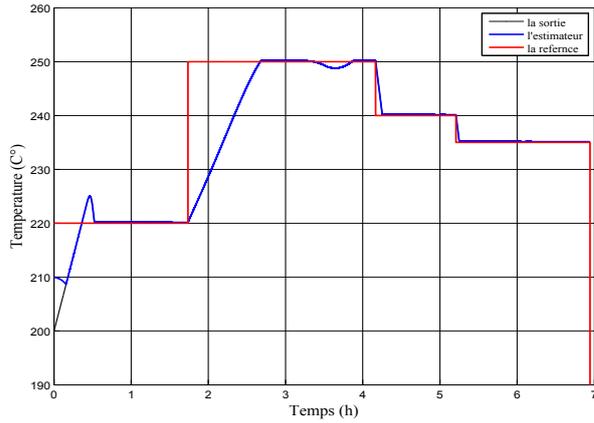


FIGURE 6.9 – Résultat de la poursuite de référence

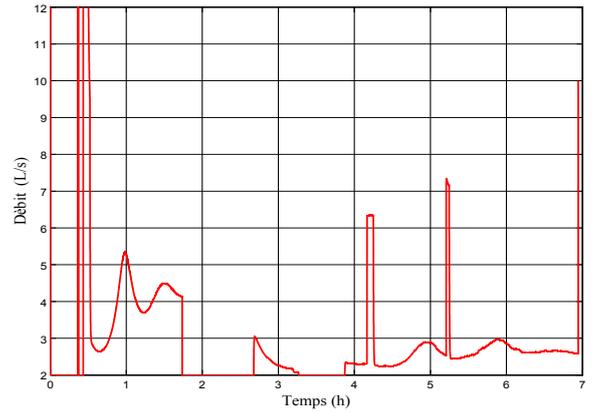


FIGURE 6.10 – La variation de commande

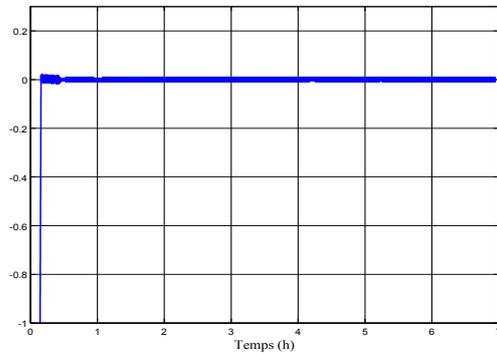


FIGURE 6.11 – l'erreur d'estimation à la sortie

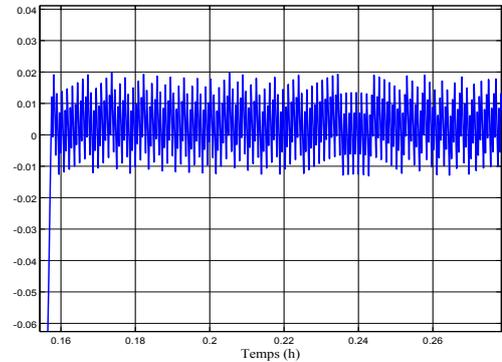


FIGURE 6.12 – Zoom 1 sur l'erreur d'estimation

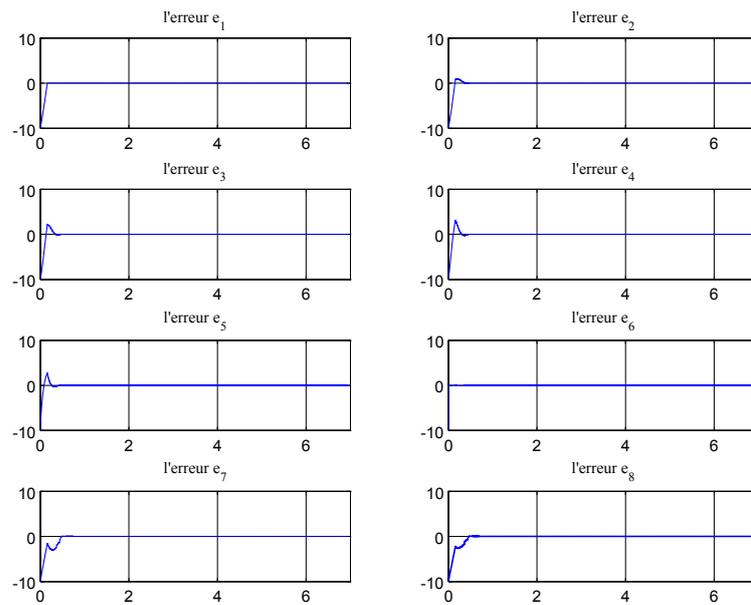


FIGURE 6.13 – Les 8 premiers erreurs d'estimations

La figure 6.1 montre un bon suivi de la référence même en présence des erreurs de discrétisation, avec un temps de réponse acceptable, ce qui donne le caractère robuste de la commande par mode glissant à base de l'observateur par mode glissant. pourtant qu'un petit dépassement au début est remarquable.

La figure 6.6 montre les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états, ces erreur sont grandes par rapport aux erreurs vues au chapitre précédent, elles varient dans une intervalle maximale de  $[-8,8]$  C°.

## 6.5 Conclusion

les résultats obtenus au cours de ce chapitre sont plus au moins acceptables, le suivi de la poursuite est vérifié, les erreurs d'estimations sont limités et comprises dans une boule de 8 C°, pourtant que ces résultats ne satisfont pas nos exigences en comparant avec ceux trouvées dans le chapitre précédent, soit dans la poursuite qui possède des dépassements dans l'autre observateur, ou bien dans les erreurs d'estimations qui sont comprises dans une boule supérieur à celle trouvée en premier temps ( soit 4 C° ).

# Conclusion générale

Ce projet a été consacré à l'étude des systèmes solaires thermiques basés sur des collecteurs cylindro-paraboliques pour répondre à l'objectif de construire une économie basée non seulement sur l'énergie des carburants, mais aussi sur l'énergie solaire qui reste une source gratuite et non polluante.

Dans le premier chapitre nous avons donné une description générale du central suivie par une modélisation et simulation par un régulateur classique PID, ensuite, pour augmenter l'exactitude du modèle nous avons introduit une erreur de discrétisation bornée dépendant de l'état et de la commande, ce qui génère des difficultés dans les synthèses des commandes et d'observation mais ça nous permet d'évoluer sa fiabilité et sa précision.

La soumission du système commandée à cette erreur, à des fortes non-linéarités et à des variations temporelles, rend sa commande un peu délicat, tel que, les algorithmes de commande classiques (par exemple : PID) ne peuvent pas satisfaire les exigences sur la précision et la performance du système désiré. Pour cela on entame dans le deuxième chapitre la première commande robuste  $H_\infty$ , commençant par des rappels théoriques, et donnant le principe de cette commande, telle que, on a minimisé la norme infinie des deux fonctions (la sensibilité et la sensibilité complémentaire) afin d'imposer des performances désirées pour le système, Cette commande a prouvé sa robustesse vu les bonnes réponses qu'elle a données malgré l'existence des différentes sources des perturbations (radiation, erreurs de discrétisation, variations paramétriques).

Dans le troisième chapitre, et pour améliorer la réponse obtenue précédemment, nous avons appliqué la commande par mode glissant directement sur le modèle non linéaire, nous citons en premier temps, son idée générale puis les différentes étapes de synthèse, nous avons vu que cette commande utilise toute sa force pour réaliser les objectives, comme elle a assuré la robustesse et donnée des bonnes performances par rapport à la commande  $H_\infty$ , cependant, cette commande a besoin des informations sur les états du système qui ne sont malheureusement pas mesurables, pour cela nous avons implémenter des observateurs d'états non-linéaires dans les chapitres suivants.

Dans le quatrième chapitre, nous avons introduit l'observateur à grande gains sur le système, qui prend en compte la non stationnarité et la non linéarité des procédés industriels, nous avons tout d'abord, décrit les observateurs en général, ensuite, nous avons focalisé sur l'observateur à grand gains, commençant par la vérification de ses hypothèses qui sont nécessaires pour la démonstration de convergence. Ensuite, nous avons appliqué la commande par mode glissant synthétisée via cet observateur, faisant une démonstration de convergence globale de l'erreur d'estimation et de poursuite, cette analyse a été validé par des simulations et des tests de robustesse, qui nous confirment la convergence des erreurs de poursuite et d'estimation du système incertain dans une rayon maximal de 4 C°, c'est un résultat très acceptable.

Par la suite, dans le cinquième chapitre, nous avons essayé d'utiliser un autre observateur "par

mode glissant" pour faire une étude comparative avec l'observateur à grand gains, nous avons démontré sa convergence avec la fonction de Lyapounov et nous l'avons validé par des simulations.

# Bibliographie

- [1] J.H. Ahrens et H.K. Khalil. *"Output Feedback Control Using High-Gain Observers in the Presence of Measurement Noise"*. Conférence, Boston, Massachusetts. 2004.
- [2] P. Apkarian. *"éléments de la théorie de la commande robuste"*.
- [3] G. Balas, et al. *"Robust Control Toolbox For Use with MATLAB "*, guide, MathWorks, 2005-2006.
- [4] A.A. Ball et H.K. Khalil. *"High-Gain-Observer Tracking Performance in the Presence of Measurement Noise"*. American Control Conference. 2004.
- [5] M.A.N. Bennamia et M.A. salamani. *Commandes robustes appliquées à la stabilisation d'un Navire*. Projet de Fin d'étude, École Nationale Polytechnique Alger. 2007.
- [6] M. Berenguel et R. Rubio. *"Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant"*. IEEE Transactions, vol,3, no, 4. 1995.
- [7] M. Beschi et A. Visioli. *"Constrained Temperature Control of a Solar Furnace "*, IEEE Transactions on control systems technology, vol, 20, no, 5. 2012.
- [8] S. Bouaichaoui. *"L'électricité d'origine solaire : Les centrales solaires thermodynamiques"*. 2002.
- [9] H. Bouchareb. *"Observateur non linéaire mode glissant"*. Thèse de Magister, sétif. 2013.
- [10] N.S. Boukhalfa. *"Synthèse d'observateurs : application au diagnostic de défauts"*. Mémoire de magister. Université de Tizi ouzou.
- [11] E.F. Camacho et F.R. Rubio. *"A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part II "*, Solar Energy 81. 2007.
- [12] E.F. Camacho et M. Berenguel. *"Advances in Industrial Control"*, Springer, 1997.
- [13] H. Cherrid. *"Commande et observateur par modes glissants d'ordre un et deux : application aux systèmes robotisés"*. Thèse de doctorat, L'université Versailles saint quentin. 2001.
- [14] C.M. Cirre. *"Application of Predictive Sliding Mode Controllers to a Solar Plant "*, IEEE Transactions on control systems technology, vol, 16, no, 4. 2008.
- [15] D. Faillea et S. Liu. *"Control design model for a solar tower plant "*, Energy Procedia 49. 2014.
- [16] L. Fraguela. *"Design of a Prescribed Convergence Time Uniform Robust Exact Observer in the Presence of Measurement Noise"*. Conférence on Décision and Control Maui, Hawaii, USA. 2012.
- [17] A.J Gallego et E.F Camacho. *"Estimation of effective solar irradiation using an unscented Kalman filter in a parabolic-trough field"*. Solar Energy 86 Elsevier. 2012.

- [18] A.J. Gallego et E.F. Camacho. "*Observer-based Model Predictive Control of a parabolic-trough field*". Solar Energy (97). 2013.
- [19] A.J. Gallego et F. Fele. "*Observer-based Model Predictive Control of a parabolic-trough field*". Solar Energy 97 Elsevier. 2013.
- [20] A.F. Garcia. "*Parabolic-trough solar collectors and their applications* ", Renewable and Sustainable Energy Reviews 14. 2010.
- [21] J.P. Gauthier, et G. Bornlrd. "*Observability for an y u(t) of a class of nonlinear systems*". IEEE Transactions. 1980.
- [22] J.P. Gauthier et H. Hammouri. "*A Simple Observer for Nonlinear Systems - Application to Bioreactors*". IEEE Transactions on Automatic Control, vol, 37 : pp. 875–880. 1992.
- [23] D.W. Gu et P.Hr. petkov. "*Robust control design with MATLAB*". Springer. 2005.
- [24] S. Hajri. "*Commande dynamique par mode glissant, application à la Robustification des processus complexes*". These de doctorat, université de Lille. 1997.
- [25] H. Hammouri et G. Bornardand. "*A High Gain Observer for a Class of Uniformly Observable Systems*". Conference Declrlon end Control, England. 1991.
- [26] B. Jaballah. "*Observateurs robustes pour le diagnostic et la dynamique des véhicules*". Thèse de doctorat, École Nationale d'ingénieurs de Monastir. 2012.
- [27] H. Kadraoui. "*Etude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire*", Thèse de Magistère universite Abou-Baker Belkaid, 2011.
- [28] B. Khoukhi. "*Modélisation et commande d'un système solaire thermique-dessalement eau de mer*". Projet de Fin d'étude, École Nationale Polytechnique Alger. 2013.
- [29] D. Limon et I. Alvarado. "*Robust control of the distributed solar collector field ACUREX using MPC for tracking* ", 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, Automatic Control. 2008.
- [30] M.S. Mahgoun. "*Application de la commande H-infini aux systèmes linéaires perturbée*". Thèse de Magister université ferhat abbass. 2012.
- [31] B. Mazari et K. Hakiki. "*Observateur par modes glissants sous forme triangulaire à l'injection de sortie d'un robot pneumatique*".
- [32] M. Oueder. "*Synthèse d'observateur pour les système non linéaires*". Thèse doctorat, université de Caen. 2012.
- [33] EM. Pasamontes et J.D. Alvarez. "*Hybrid modeling of a solar-thermal heating facility* ", Solar Energy 97. 2013.
- [34] S. Quoilin. "*Les Centrales Solaires à Concentration*". Université de Liège, 2002.
- [35] A. SBOUI. "*synthèse d'observateur pour les systemes non lineaires à retards*". Thèse de doctorat, université de Caen. 2010.
- [36] A.A. Stoorvogel. "*The  $H_\infty$  control problem : a state space approach* ", Cours, Université de Michigan. 2000.
- [37] M. Triki. "*synthèse d'observateur pour des classes de systemes non lineaires*". Thèse doctorat, université de Caen. 2006.

- [38] K.C. Veluvolu. *"High-Gain Observers With Sliding Mode for State and Unknown Input Estimations "*, IEEE Transactions on industrial electronics, vol, 56, no,9. 2009.
- [39] [www.actu-environnement.com](http://www.actu-environnement.com).
- [40] [www.ecosources.info](http://www.ecosources.info).
- [41] L. Zetao. *"Controbution à l'elaboration d'algorithmes d'isolation et d'identification des defauts dans les systemes non lineaires"*. Institut national de Toulouse.