

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

École Nationale Polytechnique  
Laboratoire de Commande des Processus



Département d'automatique

*Mémoire de :*

*Master en Automatique*

***THÈME***

**ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE  
L'OBSERVATEUR A GRAND GAINS ET  
L'OBSERVATEUR PAR MODE GLISSANT**

**Travail réalisé par :**

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).*

## 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 d'une commandes robuste mode glissant 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, 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 control : sliding mode 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, high gain estimator, incertain system.

---

ملخص :

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 بالشكل المقعر الأسطواني عن طريق التحكم المتين بالنمط 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 من أجل تقدير درجات الحرارة الخاصة بالمائع، وقمنا بمقارنة المراقبين، أخيرا أثبتنا صحة الدراسة عن طريق المحاكات.

**الكلمات المفتاحية :** محطة شمسية حرارية، التحكم المتين، تحكم النمط الانزلاقي.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 COMMANDE PAR MODE GLISSANT</b>	<b>2</b>
1.1 Le mode glissant	3
1.1.1 Choix de la surface du glissement [1]	3
1.1.2 Condition d'existence du régime glissant [1][4][16]	4
1.1.3 Principe d'invariance [12]	5
1.2 Le mode non glissant [7][8]	5
1.2.1 Conditions d'attractivité	5
1.2.2 Approche directe	6
1.2.3 Approche de LYAPUNOV [6][8]	6
1.3 Synthèse de la commande de mode glissant d'ordre 1 [16]	7
1.4 Elimination du phénomène de chattering	7
1.4.1 Solution de couche limite [13][14]	7
1.4.2 Solution par des lois d'approche [14][15]	8
1.4.3 Solution par des modes glissants d'ordre supérieur [1][4][11][13]	8
1.5 CONCLUSION	8
<b>2 OBSERVATEUR PAR MODE GLISSANT</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction	9
2.2 Observateur classique par modes glissants	9
2.2.1 Observateur triangulaire par modes glissants	10
<b>3 OBSERVATEUR À GRAND GAINS</b>	<b>11</b>
3.1 Étapes d'application	11
3.1.1 En absence de $\Delta f$	11
3.1.2 En Présence de $\Delta f$	12
<b>4 APPLICATION SUR LA STATION SOLAIRE À CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE : COMMANDE PAR MODE GLISSANT A BASE D'OBSERVATEUR</b>	<b>13</b>
4.1 Modélisation du système	13
4.1.1 Bilan énergétique	14
4.1.2 Représentation d'état	15
4.2 Résultats de Simulation	17
4.2.1 Application sur le Système incertain	17
4.2.2 Observateur à grand gains	19
4.2.3 Observateur par mode glissant	19
<b>Conclusion générale</b>	<b>20</b>
<b>Bibliography</b>	<b>21</b>

# Table des figures

1.1	phénomène du chattering . . . . .	2
1.2	Linéarisation exacte de l'erreur . . . . .	4
1.3	Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement . . . . .	6
1.4	Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalent. . . . .	7
4.1	schéma de principe du circuit d'huile . . . . .	13
4.2	schéma de principe du circuit d'huile . . . . .	14
4.3	Résultat de la poursuite de référence (grand gains) . . . . .	17
4.4	Résultat de la poursuite de référence (mode glissant) . . . . .	17
4.5	La variation de commande (grand gains) . . . . .	17
4.6	La variation de commande (mode glissant) . . . . .	17
4.7	Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états (grand gains) . . . . .	18
4.8	Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états (mode glissant) . . . . .	18

# 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

## 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 tel que, les émissions de CO<sub>2</sub>, 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 telle 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.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter la commande robuste ” par mode de glissement ”. En commençant par donner sa notion avec les étapes d'application, en suite, on va l'appliquer sur notre système, le développement fait, va être validé par des simulations .

Dans le deuxième 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 synthétisées via cet observateur en faisant une démonstration de convergence globale d'erreur d'estimation et d'erreur de poursuite .

Dans le troisième chapitre on parle de 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.

Finalement, On va faire une étude comparative entre les deux observateur vus dans les deux chapitres précédents, avec une application sur une station solaire thermique, on donne des simulation pour valider l'étude.

# Chapitre 1

## COMMANDE PAR MODE GLISSANT

### INTRODUCTION

Les lois de commande classique tel que PID donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes. Les lois de commande dite à structure variable constituent une bonne solution à ces problèmes. La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire [3]. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue.

Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une "variété" ou "surface" dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système de correspondre avec celle définie par l'équation de la surface. Quand l'état est maintenu sur cette surface, le système est dit en régime glissant. Ainsi tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation (dans une gamme qui reste plus large par rapport à celle des approches classiques de l'automatique), et à certaines perturbations.

Ce mode de glissement est souvent qualifié d'idéal du fait qu'il requiert pour exister, une fréquence de commutation infiniment grande [10]. De fait, tout système de commande comprend des imperfections telles que retards, hystérésis, qui imposent une fréquence de commutation finie. La trajectoire d'état oscille alors dans un voisinage de la surface de glissement, phénomène appelé **chattering** ou **broutement**.

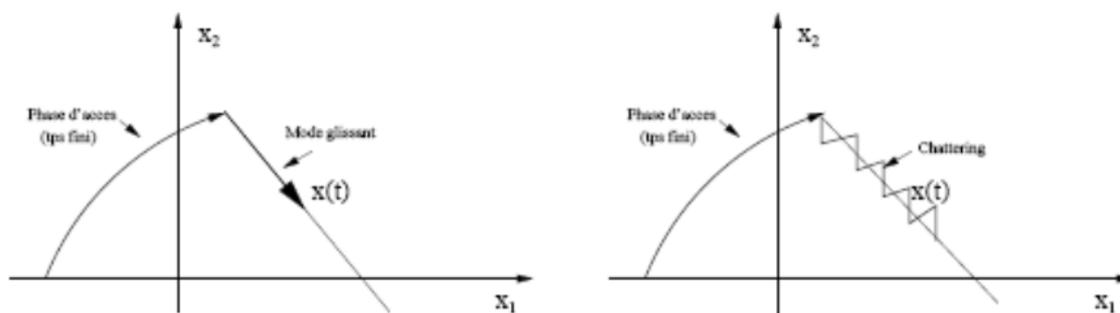


FIGURE 1.1 – phénomène du chattering

Ce type de systèmes a en général deux modes de fonctionnement :

- \* Le mode non glissant, (reaching mode) ou encore mode d'accès.
- \* Le mode glissant, (sliding mode).

## 1.1 Le mode glissant

L'étude du régime glissant d'un système de commande à structure variable sous-entend la définition et l'étude de problèmes particuliers tels que [16] :

- \* Choix de la surface de glissement.
- \* Existence et unicité des solutions en régime glissant (commande équivalente).
- \* Invariance du régime glissant vis à vis d'incertitudes paramétriques et/ou perturbations.

### 1.1.1 Choix de la surface du glissement [1]

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire ainsi que la forme de ces dernières, ces deux facteurs sont en fonction de l'application et l'objectif visé. Soit le système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t)u(t) \quad (1.1)$$

Il faut choisir  $m$  surfaces de glissement pour un vecteur  $u$  de dimension  $m$ . En ce qui concerne la forme de la surface, deux possibilités se présentent, soit dans le plan de phase ou dans l'espace d'état, pour ce dernier, on trouve la méthode connue par « loi de commutation par retour d'état ». Celle-ci utilise les concepts de la commande par retour d'état pour synthétiser la loi de commutation, la loi de commutation est donnée par la forme suivante :

$$S(x, t) = \begin{bmatrix} S_1(x, t) \\ \vdots \\ S_m(x, t) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Avec :

$x \in R^n$  Vecteur d'état du système.

$T \in R^{m \times n}$  Matrice des gains définissant la dynamique de la surface de glissement, donc :

$$S_i(x, t) = \sum_{j=1}^n T_{ij}x_j \quad (1.3)$$

Dans le cas du traitement dans l'espace de phase, la fonction de commutation est une fonction scalaire, telle que la variable à régler glisse sur cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase. Ainsi la surface  $S(x)$  représente le comportement dynamique désiré du système.

J.J Slotine [1][3] propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable  $x$  à sa valeur de consigne.

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (1.4)$$

$x$  : variable à commander.

$e(x)$  : l'erreur de poursuite  $e(x) = x - x_d$ .

$\lambda_x$  : Une constante positive qui interprétera la dynamique de la surface.

$r$  : le degré relatif de système.

$S(x) = 0$  Est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ , pour un choix convenable du gain. La linéarisation exacte de l'erreur consiste à forcer sa dynamique d'être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre  $r$ .

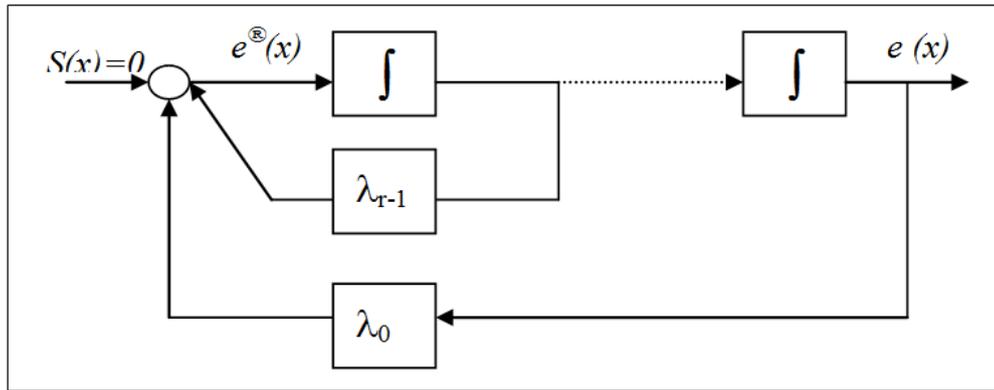


FIGURE 1.2 – Linéarisation exacte de l'erreur

### 1.1.2 Condition d'existence du régime glissant [1][4][16]

Les systèmes de commande à structure variable sont modélisés par des équations différentielles présentant des discontinuités, (dans le second membre), du fait de la commutation de la commande. Ils ne satisfont donc pas les résultats conventionnels d'existence et d'unicité de la théorie des équations différentielles ordinaires. La question est de savoir si le système a un comportement dynamique unique quand  $s(x)=0$ . Différentes méthodes de prolongement par continuité ont été proposées.

Toutefois, une des approches les plus anciennes et les plus formalisées mathématiquement est la méthode développée par FILIPPOV. Elle constitue une théorie mathématique systématique pour les équations différentielles avec discontinuités. Elle possède néanmoins l'inconvénient de s'appliquer au cas mono entrée. Dans le cas multi entrées, la méthode de la commande équivalente peut être considérée comme une extension formelle de cette dernière.

Pour développer cette technique, on considère le modèle d'état (1).

On suppose que la trajectoire d'état atteint l'hypersurface de glissement à l'instant  $t_0$  et qu'un mode glissant existe pour  $t \geq t_0$ . Cela implique :

$$\begin{cases} S(x) = 0 \\ \dot{S}(x) = 0 \end{cases}$$

Ce qui conduit après substitution de  $\dot{x}$  à écrire :

$$\frac{\partial s}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial s}{\partial x} [A(x, t) + B(x, t)u_{eq}(t)] = 0 \quad (1.5)$$

Où  $u_{eq}$  est **la commande équivalente** qui résout l'équation. Cette commande étant supposée connue et introduite dans l'équation du modèle, on obtient alors le modèle du comportement du système sur la surface de glissement en supposant que la condition initiale  $x(t_0)$  vérifie  $S(x(t_0)) = 0$ .

Le calcul de la commande équivalente est possible si  $\left[ \frac{\partial s}{\partial x} \right] B(x, t)$  est inversible pour tout  $t$  et  $x$ . Alors :

$$u_{eq}(t) = - \left[ \left[ \frac{\partial s}{\partial x} \right] B(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} A(x, t) \quad (1.6)$$

Ainsi,  $S(x(t_0))$  pour donner, le modèle du système sur la surface de glissement est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \left[ I - B(x, t) \left[ \left[ \frac{\partial s}{\partial x} \right] B(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} \right] A(x, t) \\ S(x) = 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

Il est remarquable de constater que les dynamiques du système en mode glissant sont d'ordre inférieur au système original. Cette réduction d'ordre est aisément explicable par le nombre de variables d'état contraintes par la relation  $S(x) = 0$ .

### 1.1.3 Principe d'invariance [12]

Le développement d'une forme générale de la commande a structure variable, nécessite le modèle du système, la forme générale du modèle est donné par :

$$x = b(x)[f(x) + u + d(t)] \quad (1.8)$$

L'équation (8) représente le modèle exact du système, qui en réalité ni jamais connu complètement. En conséquence, un modèle nominal ou approximatif du système déterminé analytiquement et/ou expérimentalement est utilisé pour développer une loi de commande. La différence entre le modèle exact et nominal a un impact direct sur les performances de la commande.

La capacité de la commande de maintenir la stabilité en présence de grandes erreurs de modélisations est appelé « stabilité robuste », pour les commandes linéaires, l'une des méthodes pour assurer la stabilité robuste est d'estimer l'amplitude et la forme de l'erreur de modélisation, et après examiner les réponses fréquentielles de la boucle fermée (modèle nominal inclus) et l'erreur de modélisation pour garantir que le critère de la stabilité robuste est toujours vérifié.

Pour le mode de glissement, la stabilité robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation est automatiquement garantie en introduisant explicitement l'estimation des amplitudes erreurs de modélisations dans la loi de commande. Les deux, commande linéaires et commande par mode glissants, requiert l'estimation de l'erreur de modélisation, c'est comment les considérer qui diffère. Les performances se dégradent quand l'erreur augmente dans les deux cas.

Pour les modes glissants, la modélisation des erreurs ainsi que les perturbations est souvent spécifiée par une majoration comme suit : la différence entre  $f(x)$  nominal et réel peut être représenté par :

$$f(x) = \hat{f}(x) + \Delta f(x) \quad (1.9)$$

Où  $\hat{f}(x)$  est valeur nominale. L'amplitude de l'incertitude est bornée par :

$$F(x) \geq \Delta f(x) \quad (1.10)$$

L'incertitude bornée du terme  $b(x)$  est spécifiée par  $\beta$ , avec :

$$\frac{1}{\beta} \leq \frac{\hat{b}(x)}{b(x)} \leq \beta \quad (1.11)$$

Où  $\hat{b}(x)$  est valeur nominale. De même la majoration sur la perturbation,  $d(t)$ , est caractérisée par :

$$D(t) = |d(t)| \quad (1.12)$$

Majoration de la perturbation inclus aussi, toute dynamique non modélisée, non linéarités non structurée et les variations paramétrique en dehors de  $F(x)$  ou  $\beta$ .

Les majorations sur les erreurs de modélisation et les perturbations (  $F(x)$ ,  $\beta$  et  $D(t)$  ) sont utilisés pour définir le gain  $K$  pour le mode non glissant.

## 1.2 Le mode non glissant [7][8]

Le mode préliminaire au mode glissant, partant d'une condition initiale quelconque pour atteindre la surface de glissement est appelé « **attractivité** » ou **mode non glissant**, (reaching mode en anglais). La définition complète de ce mode nécessite la définition d'une **condition d'attractivité** ainsi que la définition de la loi de commande non linéaire et de sa structure.

### 1.2.1 Conditions d'attractivité

Cette condition est en fait la condition sous laquelle le mode de glissement existe et sous laquelle la trajectoire d'état va effectivement atteindre la surface de glissement en un temps fini. Deux types de conditions d'accès à la surface de glissement sont présentés.

### 1.2.2 Approche directe

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.

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{lorsque } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{lorsque } S(x) > 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

Où bien :

$$\dot{S}_i(x, t) S_i(x, t) < 0 \quad i = 1, \dots, m. \quad (1.14)$$

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.

### 1.2.3 Approche de LYAPUNOV [6][8]

Il s'agit de formuler une fonction scalaire définie positive  $V(x) > 0$  pour les variable 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.

$$\dot{V}(x) < 0 \quad \text{avec } V(x) > 0 \quad (1.15)$$

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (1.16)$$

Pour que la fonction de lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifie si :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (1.17)$$

Cette équation explique que le carré de la distance vers la surface, mesurée par  $S(x)^2$ , 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 :

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2(x) \leq -\eta |S(x)| \quad (1.18)$$

Où  $\eta$  est une constante, qui définira le temps de convergence vers la surface de glissement .

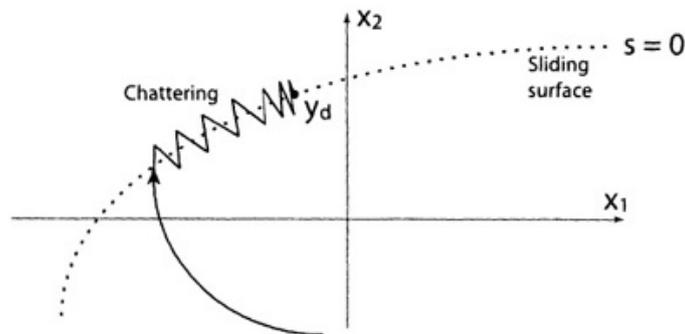


FIGURE 1.3 – Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface de glissement .

### 1.3 Synthèse de la commande de mode glissant d'ordre 1 [16]

La synthèse de la commande par modes glissants d'ordre 1 se fait en trois étapes :

- \* choix de la surface de glissement
- \* Etablir la condition de convergence
- \* déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, schématisée sur la figure I.4 .La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S = 0$ . Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

$$S = 0 \quad \text{et} \quad \dot{S} = 0$$

Où  $u_{eq}$  est déduite de la relation  $\dot{S} = 0$ .

Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande  $u$ .

Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande  $u$  est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue assurant une convergence et un régime glissant.

$$u = u_{eq} + u_d \quad \text{avec} \quad u_d = -\alpha \text{sign}(s) \quad (1.19)$$

$\alpha$  est une constante positive,  $\text{sign}$  est la fonction signe et  $u_d$  est la commande discontinue.

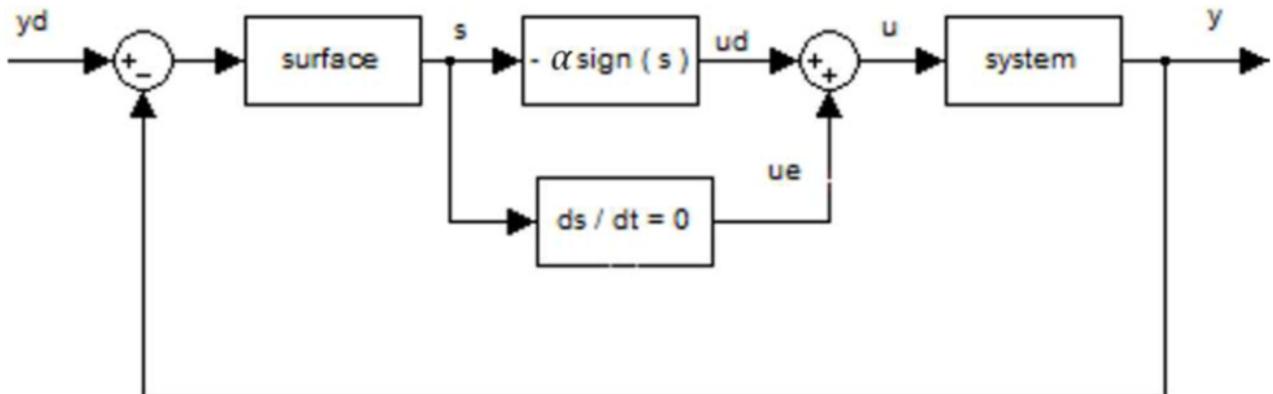


FIGURE 1.4 – Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalent.

### 1.4 Elimination du phénomène de chattering

Le problème des régimes glissants est que la commande est discontinue sur la surface de glissement et par conséquent, elle va commuter régulièrement ceci à chaque traversée de cette surface, ceci à une fréquence infinie[5][10][11][12], une telle commande, en plus d'être difficile à réaliser en pratique, peut ne pas être directement applicable au système.

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre supérieur, approach law, etc. . .

#### 1.4.1 Solution de couche limite [13][14]

Cette solution, connue aussi sous le nom de “ boundary layer solution ”, consiste à remplacer la fonction discontinue signe par une approximation continue, Voir l'Annexe A pour plus des détails.

### 1.4.2 Solution par des lois d'approche [14][15]

Par ailleurs, une approche intéressante consiste à concevoir des lois de convergence non linéaires qui permettent une adaptation dynamique d'une composante de la commande en fonction de la variation de la fonction de glissement, Voir l'Annexe B.

### 1.4.3 Solution par des modes glissants d'ordre supérieur [1][4][11][13]

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le Chattering.

## 1.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons vu la commande par mode de glissement, qui est une commande non linéaire robuste, elle consiste à amener le système à une surface dite de glissement, sur laquelle les objectifs de commande sont réalisables, et le maintenir sur cette surface. Nous avons vu aussi le plus grand problème de cette commande, qui est le phénomène de chattering, et les solutions proposées pour l'éliminer.

## Chapitre 2

# OBSERVATEUR PAR MODE GLISSANT

### 2.1 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.

### 2.2 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 :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{cases} \quad (2.1)$$

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

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} &= \hat{x}(x, u) + \Lambda \text{sign}(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{y}} &= \hat{h}(\hat{x}) \end{cases} \quad (2.2)$$

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 :

$$S(x) = y - \hat{y} \quad (2.3)$$

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 :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

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

### 2.2.1 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 :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 + g_1(x_1, u) \\ x_3 + g_2(x_1, x_2, u) \\ \vdots \\ x_n + g_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, u) \\ f_n(x) + g_n(x, u) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

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 :

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1} \\ \dot{\hat{x}}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_2 + g_1(x_1, u) + \lambda_1 \text{sign}_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_3 + g_2(x_1, \bar{x}_2, u) + \lambda_2 \text{sign}_2(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \vdots \\ \hat{x}_n + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}, u) + \lambda_{n-1} \text{sign}_{n-1}(\bar{x}_{n-1} - \hat{x}_{n-1}) \\ f_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u) + \lambda_n \text{sign}_n(\bar{x}_n - \hat{x}_n) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

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

$$\bar{x}_i = \hat{x}_i + \lambda_{i-1} \text{sign}_{moy, i-1}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \quad (2.7)$$

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.

## Chapitre 3

# OBSERVATEUR À GRAND GAINS

Soit le système non linéaire :

$$\Sigma_{NL} = \begin{cases} \dot{x}_1 & = & x_2 \\ \dot{x}_2 & = & f(x_1, x_2) + Bu \\ y & = & x_1 \end{cases}$$

Donc, une structure d'observateur à grand gain s'écrit :

$$\hat{\Sigma}_{NL} = \begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 & = & \hat{x}_2 + l_1(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 & = & f(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + Bu + l_2(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{y}} & = & \hat{x}_1 \end{cases}$$

Avec :  $l_1$  et  $l_2$  sont des grands gains :

$$l_1 = \frac{\alpha_1}{\varepsilon} \quad l_2 = \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2}$$

Avec :  $(\alpha_1, \alpha_2) \in \mathbb{R}^2$ ,  $\varepsilon \ll 1$ .

### 3.1 Étapes d'application

Soit les erreurs d'estimation :

$$e_1 = x_1 - \hat{x}_2, \quad e_2 = x_2 - \hat{x}_2$$

Donc, La dynamique de ces erreurs :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 & = & e_2 - l_1 e_1 \\ \dot{e}_2 & = & \Delta f - l_2 e_1 \end{cases}$$

Avec :  $\Delta f = f(x_1, x_2) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$

Donc, on écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta f \end{pmatrix}$$

#### 3.1.1 En absence de $\Delta f$

L'erreur d'observation  $\mathbf{e}$  est **E.S** si et seulement si :  $Re(Vp) \begin{pmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{pmatrix} < 0$ .

Soit :

$$\begin{aligned} \left| \begin{array}{cc} l_1 + \lambda & -1 \\ l_2 & \lambda \end{array} \right| &= \lambda^2 + l_1 \lambda + l_2 = 0 \\ \implies \lambda^2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon} \lambda + \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} &= 0 \implies (\varepsilon \cdot \lambda)^2 + \alpha_1 \varepsilon \cdot \lambda + \alpha_2 = 0 \end{aligned}$$

Soit :

$$\lambda' = \varepsilon \cdot \lambda \implies \lambda'^2 + \alpha_1 \lambda' + \alpha_2 = 0$$

En choisissant le polynôme désiré  $(\lambda' + 2)(\lambda' + 3) = 0$ , on peut trouver les  $\alpha_i$  :  $\implies \begin{cases} \alpha_1 = 5 \\ \alpha_2 = 6 \end{cases}$

On a dans ce cas là :

$$\begin{cases} \lambda'_1 = -2 \implies \lambda_1 = \frac{-2}{\varepsilon} \\ \lambda'_2 = -3 \implies \lambda_2 = \frac{-3}{\varepsilon} \end{cases}$$

### 3.1.2 En Présence de $\Delta f$

On calcule le transfert de  $\Delta f$  vers l'erreur  $\mathbf{e}$  :

$$\begin{aligned} e(s) = \begin{pmatrix} e_1(s) \\ e_2(s) \end{pmatrix} &= \left[ SI - \begin{pmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{pmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta f(s) \\ &= \begin{bmatrix} s + l_1 & -1 \\ l_2 & s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta f \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} s + l_1 & -1 \\ l_2 & s \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} s & 1 \\ -l_2 & s + l_1 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\det = s^2 + l_1 s + l_2$$

Alors :

$$e(s) = \begin{bmatrix} \frac{s}{s^2 + l_1 s + l_2} & \frac{1}{s^2 + l_1 s + l_2} \\ \frac{-l_2}{s^2 + l_1 s + l_2} & \frac{s + l_1}{s^2 + l_1 s + l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta f$$

Donc :

$$e(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2 + l_1 s + l_2} \\ \frac{s + l_1}{s^2 + l_1 s + l_2} \end{bmatrix} \Delta f$$

tel que :

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + l_1 s + l_2} \\ \frac{s + l_1}{s^2 + l_1 s + l_2} \end{pmatrix}$$

Finalement :

$$\text{Gain}(G(s)) \simeq \varepsilon$$

## Chapitre 4

# APPLICATION SUR LA STATION SOLAIRE À CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE : COMMANDE PAR MODE GLISSANT A BASE D'OBSERVATEUR

### 4.1 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 focal 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 fonctionnent limité entre la capacité maximale 12 L/s et la seuil de sécurité 2 L/s.

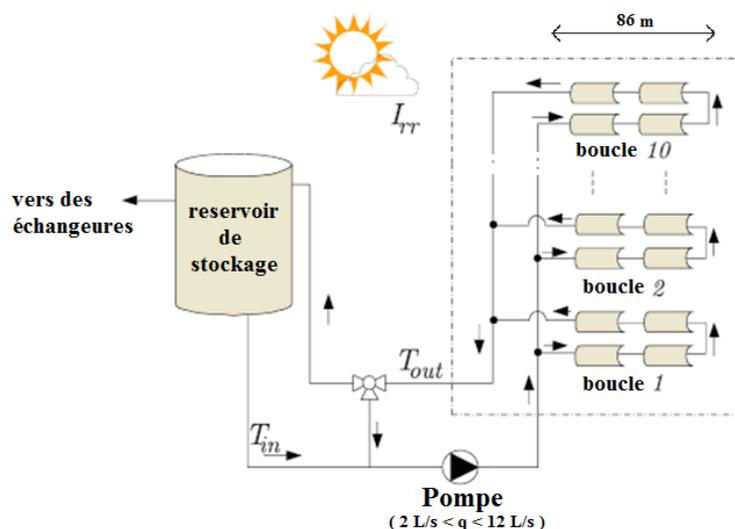


FIGURE 4.1 – schéma de principe du circuit d'huile

### 4.1.1 Bilan énergétique

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

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = IK_{opt} \eta_0 G - GH_l(T_m - T_a) - \delta_p H_t(T_m - T_f) \quad (4.1)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial l} = \delta_p H_t(T_m - T_f) \quad (4.2)$$

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

$$\begin{aligned} \rho_f &= 903 - 0.672T_f(i) \text{ (kg/m}^3\text{)} & C_f &= 1820 + 3.478T_f(i) \text{ (J/kg.C}^\circ\text{)} \\ H_l &= 0.00249\Delta\bar{T} - 0.06133 \text{ (W/m}^2\text{.C}^\circ\text{)} & \text{Avec } \Delta\bar{T} &= \frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_a \\ H_t &= (2,17.10^6 - 5,01.10^4 T_f(i) + 4,53.10T_f^2 - 1,64T_f^3 + 2,1.10^{-3}T_f^4)q^{0.8} \\ \rho_m &= 1100 \text{ (kg/m}^3\text{)} & C_m &= 840 \text{ (J/kg.C}^\circ\text{)} & A_m &= 0.0038 \text{ m}^2 \\ G &= 1,83 \text{ m} & K_{opt} &= 0.43 & A_f &= 0.0024 \text{ m}^2 & \delta &= 0.1257 \text{ m} \end{aligned}$$

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 (4.3 et 4.4).

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 :

$$\rho_m C_m A_m \frac{dT_m(l_i)}{dt} = IK_{opt} \eta_0 G - GH_l(T_m(l_i) - T_a) - \delta_p H_t(T_m(l_i) - T_f(l_i)) \quad (4.3)$$

$$\frac{dT_f(l_i)}{dt} = \frac{\delta_p H_t(T_m(l_i) - T_f(l_i))}{\rho_f C_f A_f} - \frac{q}{A_f \Delta l} (T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})) \quad (4.4)$$

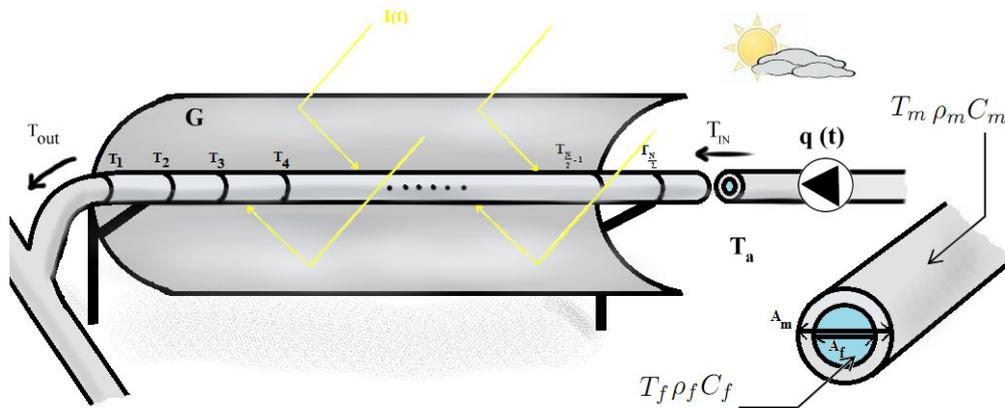


FIGURE 4.2 – schéma de principe du circuit d'huile

## 4.1.2 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 4.3 et 4.4 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, u)x(t) + B_d(x, u)d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.5)$$

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 :

$$A(x, u) = \begin{pmatrix} P_4 & P_3 & \cdots & 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & P_2 & & 0 \\ 0 & & P_4 & P_3 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_4 & 0 & 0 & \cdots & P_2 \\ P_1 & 0 & \cdots & 0 & P_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_1 & & 0 & 0 & P_0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_1 & 0 & 0 & \cdots & P_0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

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 :

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

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

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

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

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 equations 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 présenté (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 décrit par la sérié 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  $y_b$  ) :

$$y(b) = y(a) + (b - a)y'(a) + \frac{(b - a)^2}{2}y''(a) + \dots + \frac{(b - a)^n}{n!}y^n(a) \quad (4.7)$$

Et soit le développement d'ordre 1 ( l'approximation faite à 4.4 ) :

$$y(b) = y(a) + (b - a)y'(a) + E \quad (4.8)$$

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 4.1 et 4.2 tel que :

$$\frac{\partial T_f(l_i)}{\partial l} = \frac{T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})}{\Delta l} + O(\Delta l) \quad (4.9)$$

Avec :

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

Sachant que :

$$O(\Delta l) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T_f(l_i)}{\partial l^2} \Delta l \quad (4.10)$$

Et :

$$\frac{\partial^2 T_f(l_i)}{\partial l^2} = \frac{1}{\Delta l^2} [T_f(l_{i-1}) - 2T_f(l_i) + T_f(l_{i+1})] + O(\Delta l^2) \quad (4.11)$$

En introduisant cette erreur dans le système (4.9), on obtient :

$$\frac{dT_f(l_i)}{dt} = \frac{\delta_p H_t (T_m(l_i) - T_f(l_i))}{\rho_f C_f A_f} - \frac{q}{A_f \Delta l} [T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})] + \xi(x(t), q) \quad (4.12)$$

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 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, u)x(t) + B_d d(t) + \xi(x(t), u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.13)$$

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 :

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

## 4.2 Résultats de Simulation

### 4.2.1 Application sur le Système incertain

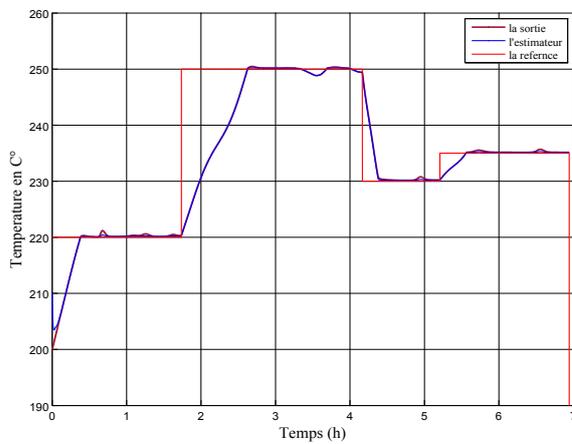


FIGURE 4.3 – Résultat de la poursuite de référence (grand gains)

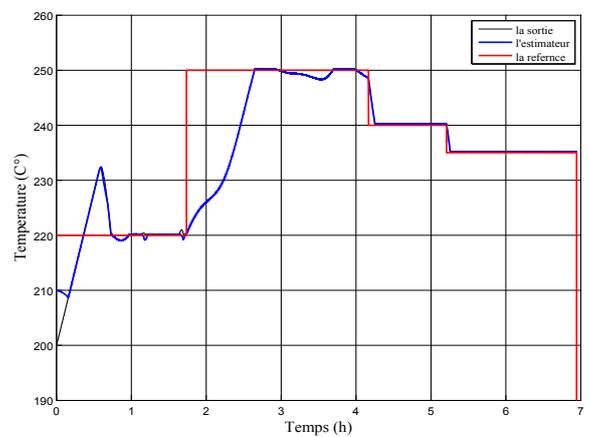


FIGURE 4.4 – Résultat de la poursuite de référence (mode glissant)

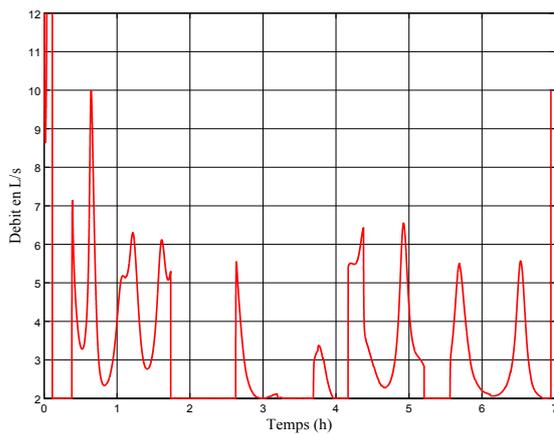


FIGURE 4.5 – La variation de commande (grand gains)

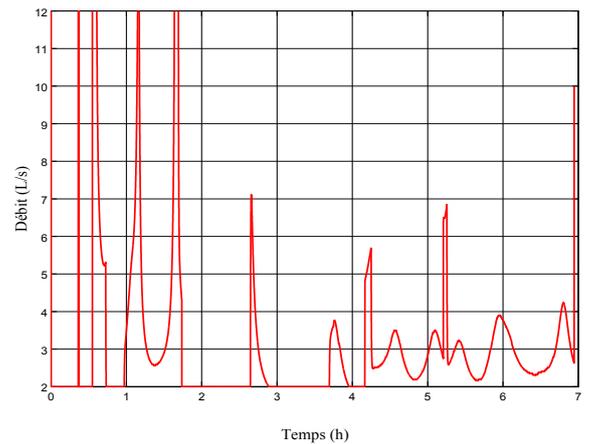


FIGURE 4.6 – La variation de commande (mode glissant)

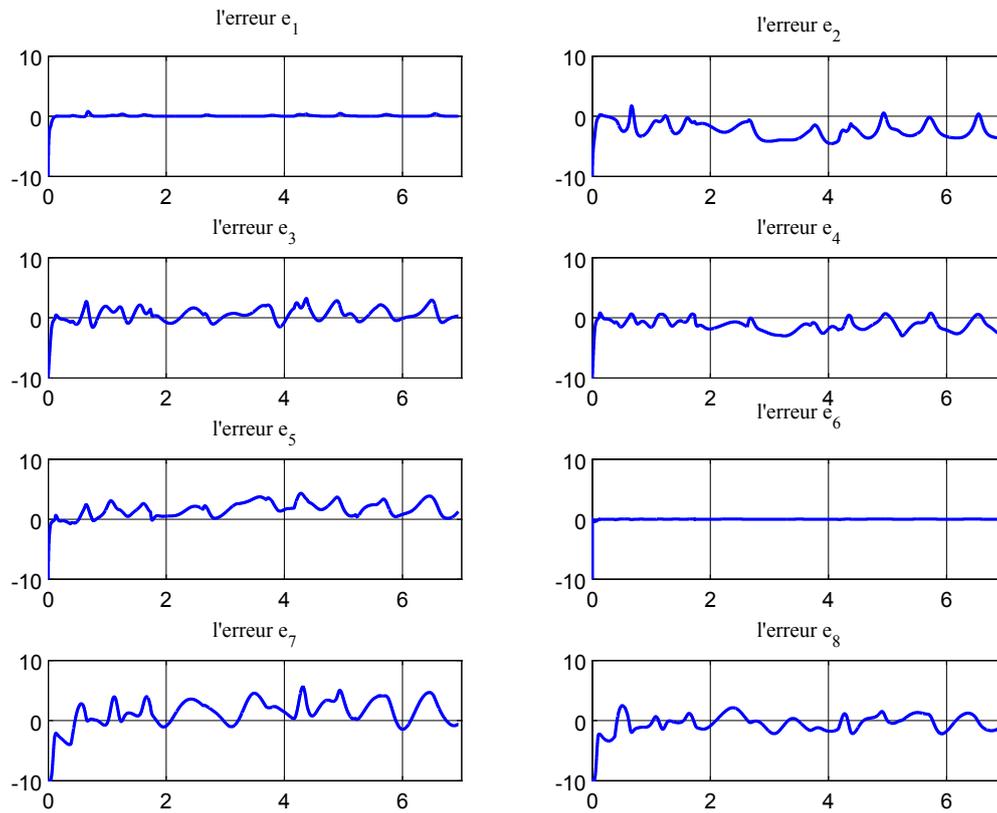


FIGURE 4.7 – Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états (grand gains)

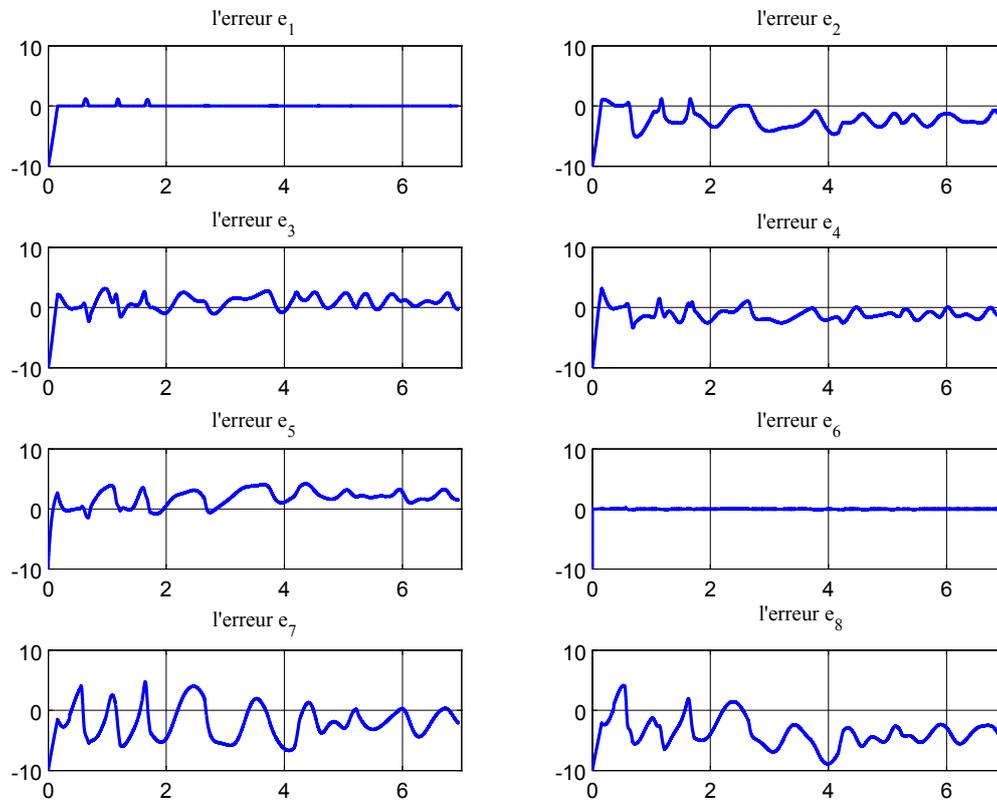


FIGURE 4.8 – Les erreurs d'estimation pour les 8 premiers états (mode glissant)

### 4.2.2 Observateur à grand gains

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 4.5 ), 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 l'introduction .

La figure 4.7 , montre les 8 premiers erreurs d'estimation, 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 théorique.

Le problème majeur de cet observateur est le phénomène de pic.

### 4.2.3 Observateur par mode glissant

La figure 4.4 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 4.8 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  $[-8,8]\text{ C}^\circ$ . Comme on a vu dans l'introduction de la commande par mode glissant, le problème majeur de cet observateur c'est le phénomène de chattering.

# 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 polluée.

Dans le premier chapitre nous avons donné une introduction générale à la commande par mode glissant, qui va être appliquée au système, à base d'observateur. Cette commande utilise toute sa force pour réaliser les objectifs, comme elle peut assurer la robustesse et donner de bonnes performances par rapport à la commande  $H_\infty$ , cependant, elle a besoin des informations sur les états du système qui ne sont malheureusement pas mesurables, pour cela nous devrions implémenter des observateurs d'états non-linéaires dans les chapitres suivants.

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit l'observateur à grande gain 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, puis nous avons décrit l'observateur par mode glissant.

Par la suite, dans le troisième chapitre, nous avons essayé d'utiliser un autre observateur "par mode glissant" pour faire une étude comparative avec l'observateur à grand gain, nous avons démontré sa convergence avec la fonction de Lyapounov et nous l'avons validé par des simulations à la partie application sur la station solaire thermique, on a conclu que l'observateur à grand gain est le plus robuste, et il donne des meilleurs résultats par rapport à l'observateur par mode glissant.

# 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.