

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 LA
COMMANDE H_{∞} ET PAR MODE GLISSANT :
APPLICATION SUR UNE STATION SOLAIRE
THERMIQUE**

Travail réalisé par :

BOUDJEDIR Chemss eddine

Proposée et dirigé :

Pr. M.Tadjine

&

Pr. M.S.Boucherit

JUIN 2015

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire de Commande des Processus de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de Monsieur M.Tadjine, et de Monsieur M.S.Bouchrit, professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Mes remerciements vont tout d'abord à Monsieur M.S.Bouchrit et à Monsieur M.Tadjine pour la confiance qu'ils m'ont faite. Leurs conseils précieux, leur compréhension, leurs encouragements et leur disponibilité m'ont beaucoup aidé.

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 de faire une étude comparative entre la commande H_{∞} et la commande par mode glissant, appliquer sur une station solaire thermique à collecteur cylindro-parabolique, et ceci pour montrer les avantages les inconvénients et l'effet de chaque commande sur la station tel que les résultats sont tiré à partir des simulations.

Mots clés : Station solaire thermique, commande robuste, mode glissant, H_{∞}

Abstract :

Our objective on this work is to study a comparative method between the H_{∞} control with the sliding mode apply in à thermal solar station, in order to describe all the advantages also the inconvenient and the effect of any control of a station, the results determined by simulation.

Key words : Solar thermal station, robust control, sliding mode, H_{∞}

ملخص:

الهدف من هذا البحث هو القيام بدراسة تقريبية بين التحكم المتين H_{∞} والنمط الانزلاقي حيث طبقناه على المحطة الشمسية الحرارية ذات المقعرات الاسطوانية حيث قمنا بالإشارة الى مختلف الايجابيات السلبية وتأثير كل واحدة على المحطة حيث حصلنا على النتائج عن طريق المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: محطة شمسية حرارية, التحكم المتين, H_{∞} , النمط الانزلاقي.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Description et Modélisation	2
1.1 Introduction	2
1.2 Principe du fonctionnement	2
1.3 Les types	3
1.3.1 Centrales à concentrateur cylindro-paraboliques	3
1.3.2 Le solaire thermique à concentration à tour :	3
1.4 Performances du collecteur	4
1.5 Le stockage de chaleur associé au solaire thermodynamique	5
1.6 Description et modélisation du système	5
1.7 Conclusion	7
2 Commande par mode glissant/H_∞	8
2.1 Introduction	8
2.2 Valeurs singulières d'une matrice de transfert	8
2.3 Modélisation d'un système incertain	9
2.4 Principe de la commande H_∞	9
2.4.1 Théorème des petits gains	9
2.4.2 La forme standard de la commande H_∞	11
2.5 développement de la commande sur le système	12
2.5.1 Choix des pondérations	13
2.5.2 Résolution des équations de RICCATI :	13
2.5.3 Calcul de la commande	14
2.5.4 Simulation	15
2.6 Introduction	18
2.7 Notion commande par mode glissant	18
2.7.1 Le phénomène de chattering ou réticence	19
2.7.2 Surface de glissement	20
2.7.3 Attractivité de la surface de glissement :	20
2.7.4 Invariance de la surface de glissement	21
2.8 développement de la commande sur le collecteur cylindro-parabolique	21
2.8.1 Le choix de la surface de glissement	21
2.8.2 Les conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement	21
2.8.3 Établissement de la loi de commande	22
2.9 Simulation	22
2.10 Étude comparative entre les différentes stratégies de commande	24
2.11 Conclusion	26
Conclusion générale	27
Bibliographie	28

Table des figures

1.1	Principe d'une centrale solaire thermique	3
1.2	concentrateur Cylindro-parabolique	3
1.3	Centrale à tour	4
2.1	Valeurs singulières et norme H_∞ d'une de transfert	9
2.2	Théorème des petits gains : stabilité robuste	9
2.3	Configuration d'une perturbation additive	10
2.4	La forme standard de la commande H_∞	12
2.5	mise sous forme standard	12
2.6	Réponse avec la commande H_∞	15
2.7	La variation de débit	15
2.8	la valeur singulière de la fonction de sensibilité S et $1/W1$	16
2.9	la valeur singulière de la fonction de sensibilité complémentaire T et $1/W2$	16
2.10	La variation de C_f	17
2.11	La variation de ρ_f	17
2.12	La variation de C_f et ρ_f	17
2.13	Attractivité et maintien de l'état par la surface de glissement	18
2.14	Le phénomène de chattering	19
2.15	La fonction de saturation	19
2.16	Réponse avec la commande par mode glissant	22
2.17	La variation de commande	23
2.18	L'irradiation solaire	23
2.19	La variation de C_f	24
2.20	La variation de ρ_f	24
2.21	La variation de C_f et ρ_f	24
2.22	la réponse par H_∞ et par mode glissant	25
2.23	La variation de commande par H_∞ et par mode glissant	25

Nomenclature

paramètre	Description	Unité
t	Temps	s
l	Longueur	m
ρ	Densité	kg/m ³
C	Capacité thermique spécifique	J/(kg K)
A	Section transversale	m ²
$T(l, t)$	Température	K
$q(t)$	Débit du fluide	m ³ /s
$I(t)$	Rayonnement solaire	W/m ²
η_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 ²)
H_t	Coefficient de transmission thermique de métal-fluide	W/(K m ²)
δ_p	périmètre mouillé	m
C	Facteur de concentration	
z	Quantificateur de performance	
W	Pondération	
y_r	Consigne	
$e(x)$	Erreur de poursuite	
S_φ	Surface de glissement	

Introduction générale

L'énergie fossile, reste toujours la principale source de production d'électricité dans notre vie, mais elle risque de disparaître dans les années à venir, et elle possède plusieurs inconvénient comme les émissions de CO₂ ainsi l'augmentations du ça prix.

Pour lutter contre ces problèmes et ces conséquences comme le changement climatique il y a plusieurs procédure de recherche pour produire l'électricité tout en manipulant d'autre ressources.

Les stations solaires thermiques sont l'une des solutions récentes dans l'industrie qui utilise cette énergie grâce à multiples avantages : possibilité de stockage thermique, hybridation, rendements de conversion solaire-électricité supérieur aux procédés photovoltaïques, et forts potentiel de réduction des coûts.

On constate La différence principale entre une centrale traditionnelle (fonctionne en utilisant des carburants ...) et une station solaire, 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, ce qui génère une difficulté pour obtenir les objectives désirées. La commande du débit est l'une des solutions les plus efficaces pour compenser ses variations.

La description générale des station solaire sera décrite dans le premier chapitre suivis par une modélisation des station à base des collecteurs cylindro-paraboliques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons appliquée deux commande, commençant par la commande robuste " H_∞ ", tout en décrivant son principe pour entamer après l'objectif visée par l'exploitation de la commande expliquant, par la suite nous établissant la loi de commande de l'écoulement de débit, suivie par des tests de robustesse et d'une simulation. Puis nous allons présenté la deuxième commande robuste "mode de glissement", en commençant par donner sa notion avec les étapes d'application, ensuite, on l'a appliquée sur notre système, et on fait des tests de robustesse. le développement fait a été validé par une simulation. Les résultats obtenus, montrent la robustesse des deux commandes.

On termine notre travaille par une étude comparative entre les deux commandes synthétisée, donnant les avantage et les inconvénients de chaqu'une .

Chapitre 1

Description et Modélisation

1.1 Introduction

L'énergie solaire a été utilisée depuis plusieurs années, non seulement pour le chauffage et l'éclairage, mais aussi pour la réfrigération, détoxification, dessalement et principalement pour la génération d'électricité. La génération d'électricité à partir de l'énergie solaire est faite, soit directement à partir de cellules photovoltaïques, soit indirectement à partir de la création de la vapeur d'eau qui fait entrainer un système turbine-alternateur.[14] Dans ce chapitre nous allons, expliquer le principe de fonctionnement d'une centrale thermique, et nous allons donner le modelé de connaissance d'un central thermique cylindro-parabolique et leur représentation d'état qui on va utiliser dans la suite dans la partie commande.

Le Soleil représente une source d'énergie considérable. Au niveau de la terre l'énergie solaire reçue annuellement correspond à environ 7000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Il s'agit d'une énergie lumineuse portée par les photons qui a pour origine les réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène ayant lieu à l'intérieur du Soleil. Elle a le potentiel de couvrir largement nos besoins énergétiques, à condition de pouvoir la convertir efficacement et à faible coût. C'est tout l'enjeu du développement actuel des deux grandes voies d'utilisation de l'énergie solaire : la filière thermique et la filière photovoltaïque. La première utilise directement la chaleur du Soleil et la seconde, certainement la plus connue du grand public, convertit le rayonnement solaire en électricité.

Nous va donner dans le premier temps le principe du fonctionnement d'une station solaire thermique, suivi par un état de l'art et une modélisation des central cylindro-paraboliques

1.2 Principe du fonctionnement

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire n'est pas un processus direct. Le principe est de produire des températures exploitables et précise pour les dispositifs thermodynamique de conversion de l'énergie thermique, celle ci permet de générer de vapeur à très haute température et à haute pression celle ci diriger vers des turbines, les mouvements des turbines ou des pistons qui font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant.

Le principe ce caractérise par les quatre étapes suivants [13] :

- concentrant les rayons solaires vers un point ou un ligne pour chauffer le fluide caloporteur.
- Absorption sur les parois du récepteur, transformation en chaleur (production de chaleur).
- transport et éventuellement stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide caloporteur selon la température de source chaude et le système utilisé).
- La conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique.

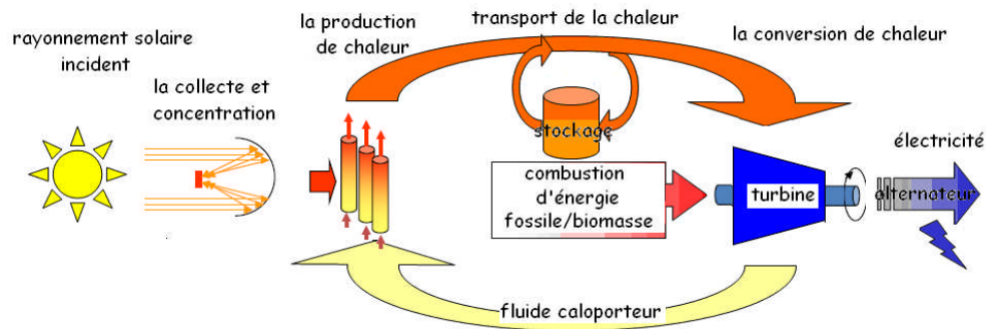


FIGURE 1.1 – Principe d'une centrale solaire thermique

1.3 Les types

Il existe plusieurs types de panneaux solaire thermiques, ils peuvent être classifiés selon plusieurs critères, comme le coût, des panneaux fixe et d'autre mobile, on peut cite ici :

1.3.1 Centrales à concentrateur cylindro-paraboliques

Une centrale solaire à concentration de type « miroirs cylindro-paraboliques » est constituée de rangées parallèles de longs miroirs creux rectangulaires. Les rangées sont généralement orientées nord-sud. Les miroirs basculent selon un axe est-ouest pour suivre la course du Soleil. Leur courbure permet de concentrer au maximum jusqu'à 100 fois les rayons du Soleil sur un tube longitudinal disposé tout le long de l'installation. A l'intérieur de ce tube circule un fluide caloporteur qui capte et transporte la chaleur. La température du fluide augmente progressivement jusqu'à atteindre environ 400°degrés Celsius. Le procédé est ensuite le même que pour d'autres types de centrales : la chaleur du fluide caloporteur est transmise à l'eau, qui se vaporise, fait tourner une turbine entraînant un alternateur qui produit de l'électricité. Certaines centrales comportent également d'immenses réservoirs de sels fondus qui permettent de stocker la chaleur pendant plusieurs heures et donc de produire de l'électricité la nuit ou par temps couvert.



FIGURE 1.2 – concentrateur Cylindro-parabolique

1.3.2 Le solaire thermique à concentration à tour :

Une centrale solaire à concentration de type "tour solaire" est constituée d'une tour et d'un champ de miroirs légèrement concaves. Appelés héliostats, ces miroirs pivotent individuellement sur deux axes afin de suivre la course du Soleil et ainsi réfléchir les rayons solaires sur une zone située en haut de la tour. La concentration n'est donc pas linéaire, comme dans le cas des centrales à miroirs cylindro-paraboliques, mais ponctuelle. Elle est également beaucoup plus importante : le sommet de la tour reçoit ainsi environ jusqu'à 1000 fois plus de rayonnement qu'en l'absence d'héliostats.

Un fluide caloporteur est amené au sommet de la tour où il circule et capte la chaleur. Il est ainsi chauffé jusqu'à une température d'environ 500 °degrés Celsius, puis redescend vers un échangeur.

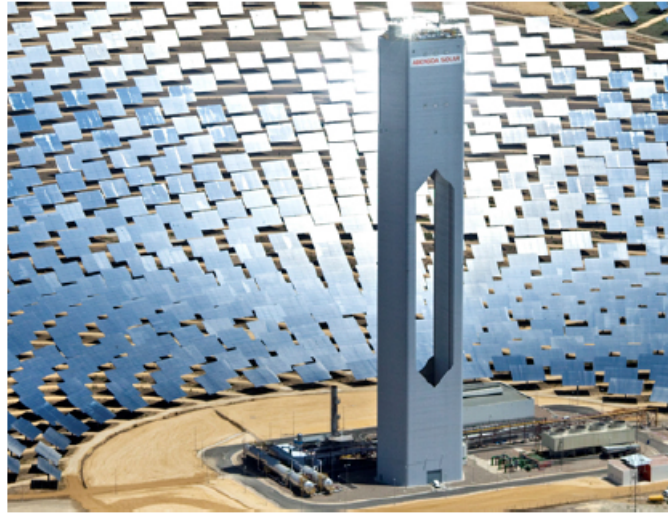


FIGURE 1.3 – Centrale à tour

1.4 Performances du collecteur

Le collecteur est le composant de base du champ solaire, il est composé d'un réflecteur parabolique (Miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire. Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 98%. 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. Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. La taille de collecteur dépend évidemment de la puissance solaire requise. Comme ordre de grandeur, on peut considérer qu'un concentrateur de 10 m de diamètre peut fournir jusqu'à 25 KW d'électricité sous un insolation de $1000 W/m^2$.

La quantité d'énergie reçue par le collecteur parabolique dépend des conditions de fonctionnement [19]

- La quantité de radiation directe incidente sur le collecteur (G).
- La température moyenne du fluide dans le récepteur (T_m) : plus cette température est élevée, plus les pertes à l'ambiance sont élevées, et plus l'efficacité diminue.
- La température ambiante (T_a) : Plus elle est faible, plus les pertes à l'ambiance sont élevées.
- L'angle d'incidence du rayonnement sur le capteur (θ) : cet angle modifie les propriétés d'absorption et de réflexion du rayonnement solaire par l'enveloppe de verre du récepteur.

La quantité d'énergie reçue dépend aussi de caractéristique physique intrinsèques au collecteur :

- Le coefficient d'échange entre le récepteur et l'ambiance, il doit être aussi faible que possible afin de minimiser les pertes à l'ambiance.
- Le coefficient de réflexion de miroirs, il est égal à la quantité de rayonnement reçue par le récepteur par rapport à la quantité incidente sur le collecteur.
- Le facteur de transmittivité-absorptivité, il est égal à la quantité de rayonnement absorbée par le tube récepteur en acier par rapport à la quantité de rayonnement incidente sur le verre du récepteur.

1.5 Le stockage de chaleur associé au solaire thermodynamique

Le soleil chauffe le fluide pendant la journée, mais les centrales solaires thermique doivent aussi fournir de l'électricité dans la nuit. La solutions est de stockée la chaleur. Actuellement plusieurs dizaines de centrales solaires thermique stockent la chaleur dans d'immenses réservoirs remplis de sels de nitrates qui peuvent rester liquides de 250 à 560 C°. Ils permettent de pallier l'absence de soleil pendant une durée maximale de 15h. Ce type de stockage ne sera toutefois pas viable à long terme : la production mondiale de sels de nitrates est trop faible pour répondre à l'accroissement prévu du nombre de centrales dans les années à venir. De plus, aucun autre liquide disponible en abondance, sans danger, non toxique, sans facteur de dépendance vis-à-vis de pays producteurs, ne peut remplacer ces sels. Les recherches s'orientent vers l'utilisation de solides, et notamment de céramiques fabriquées à partir de déchets industriels comme les cendres volantes d'incinérateurs et de centrales à charbon, des déchets métallurgiques ou amiantés. Alors que ces déchets sont abondants et actuellement sans utilité, ils peuvent, une fois transformés en céramiques, stocker la chaleur jusqu'à 1100 C°. Des tests industriels sont en cours pour déterminer leur efficacité une fois intégrés dans les réservoirs où circulent les fluides caloporteurs des centrales solaires, par exemple sous forme de plaques ondulées mesurant quelques centimètres d'épaisseur ou de structures en nids-d'abeilles.

1.6 Description et 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 fonctionnement limiter entre la capacité maximale 12 L/s et la seuil de sécurité 2 L/s.

A partir du bilan énergétique, on trouve le système d'équation différentielle partielle (*PDE*) suivant [11] :

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = IK_{opt} \eta_0 G - GH_l (T_m - T_a) - \delta_p H_t (T_m - T_f) \quad (1.1)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial l} = \delta_p H_t (T_m - T_f) \quad (1.2)$$

Où l'indice m fait référence au métal et f au fluide, il est important de noter que seulement les paramètres : ρ_m , C_m , A_f , A_m et G sont des constantes. Tant que, les paramètres H_l , ρ_f , C_f et H_t dépendent de l'état.

On discrétise le modèle précédent dans l'espace, les deux equations deviennent :

$$\rho_m C_m A_m \frac{dT_m(l_i)}{dt} = IK_{opt} \eta_0 G - GH_l (T_m(l_i) - T_a) - \delta_p H_t (T_m(l_i) - T_f(l_i)) \quad_{i=1.. \frac{N}{2}} \quad (1.3)$$

$$\frac{dT_f(l_i)}{dt} = \frac{\delta_p H_t (T_m(l_i) - T_f(l_i))}{\rho_f C_f A_f} - \frac{q}{A_f \Delta l} (T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})) \quad_{i=1.. \frac{N}{2}} \quad (1.4)$$

Le modèle décrit par ces deux équations aux différences partielles peut être divisée en $\frac{N}{2}$ segments où N désigne le nombre totale d'état correspond celle du fluide et du métal (pour le teste de simulation on va prendre $N = 30$ segments).

On présente les matrices dans l'espace d'état trouvés à partir des equation 1.3 et 1.4 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(x, u)x(t) + B(x)ad(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1.5)$$

x c'est le vecteur d'état formé par les températures du métal et du fluide.

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 :

$$A = \begin{pmatrix} P_4 & P_3 & \cdots & 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & P_2 & & 0 \\ 0 & & P_4 & P_3 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_4 & 0 & 0 & \cdots & P_2 \\ P_1 & 0 & \cdots & 0 & P_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_1 & & 0 & 0 & P_0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_1 & 0 & 0 & \cdots & P_0 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

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 :

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

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

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

$$B_d = [B_{T_{in}} \quad B_{I_{eff}} \quad B_a] \quad \text{donc} \quad C = [1 \quad 0_{1 \times N-1}]$$

Les paramètres de simulations sont :

$$\rho_f = 903 - 0.672T_f(i)(kg/m^3) \quad C_f = 1820 + 3.478T_f(i)(J/kg.C^\circ)$$

$$H_l = 0.00249\Delta\bar{T} - 0.06133(W/m^2.C^\circ) \quad \text{Avec} \quad \Delta\bar{T} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_a$$

$$H_t = (2,17.10^6 - 5,01.10^4 T_f(i) + 4,53.10 T_f^2 - 1,64 T_f^3 + 2,1.10^{-3} T_f^4) q^{0.8}$$

$$\rho_m = 1100(kg/m^3) \quad C_m = 840(J/kg.C^\circ) \quad A_m = 0.0038m^2$$

$$G = 1,83m \quad K_{opt} = 0.34 \quad A_f = 0.0024m^2 \quad \delta = 0.1257m$$

On a finalement :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}} \\ \dot{x}_{\frac{N}{2}+1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{N-1} \\ \dot{x}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_4 & P_3 & \cdots & 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & P_2 & & 0 \\ 0 & & P_4 & P_3 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_4 & 0 & 0 & \cdots & P_2 \\ P_1 & 0 & \cdots & 0 & P_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_1 & & 0 & 0 & P_0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_1 & 0 & 0 & \cdots & P_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{\frac{N}{2}} \\ x_{\frac{N}{2}+1} \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{q}{A_f \Delta l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_1 G}{\rho_m C_m A_m} \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_1 G}{\rho_m C_m A_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{G}{\rho_m C_m A_m} & \frac{H_1 G}{\rho_m C_m A_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{in} \\ T_{eff} \\ T_a \end{pmatrix}$$

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la notion générale des systèmes solaires thermiques et leur principe de fonctionnement, puis nous avons classifié les différents types des stations solaires thermiques, et après on a donné le modèle de connaissance tiré à partir de bilan énergétique, et on termine par la représentation de modèle dans l'espace d'état.

Chapitre 2

Commande par mode glissant / H_∞

A. Commande par H_∞

2.1 Introduction

La synthèse H_∞ propose un cadre général pour le calcul d'un correcteur, en manipulant des concepts fréquentiels. 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.[10] On va tout d'abord commencer par la notion des valeur singulier puis la forme standard et l'utilité des pondération et après la résolution par Riccati et on terminer par la simulation du modèle et les teste de robustesse.

2.2 Valeurs singulières d'une matrice de transfert

Considérons un système linéaire invariant avec un vecteur d'entrée $e(t)$ et un vecteur de sortie $s(t)$ de dimensions respectives m et p . Soit $G(s)$ sa matrice de transfert. En réponse à une excitation harmonique $e(t) = Ee^{j\omega t}$ la sortie du système s'écrit [9]

$$s(t) = G(j\omega)Ee^{j\omega t} \quad (2.1)$$

Pour un système monovariante, on définit à partir de cette relation le gain du système à la pulsation ω par le module $|G(j\omega)|$. Dans le cas multivariante, on utilise la notion de valeurs singulières, définies comme les racines carrées des valeurs propres de $G(j\omega)$ multipliée par sa transconjuguée :

$$\sigma_i(G(j\omega)) = \sqrt{\lambda_i(G(j\omega)G(-j\omega)^T)} = \sqrt{\lambda_i(G(-j\omega)^T G(j\omega))} \quad (2.2)$$
$$i = 1, \min(m, p)$$

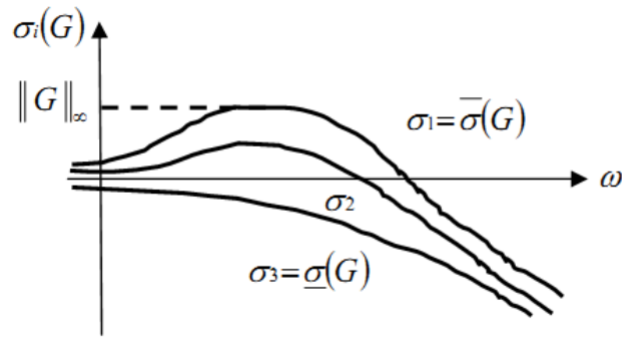
On peut remarquer que les produits $G(j\omega)G(-j\omega)^T$ et $G(-j\omega)^T G(j\omega)$ sont des matrices hermitiennes semi-définies positives. dont les valeurs propres sont par conséquent réelles positives ou nulles : il est donc licite d'utiliser leur racine carrée (par ailleurs les valeurs propres non nulles de ces deux matrices sont identiques). Les valeurs singulières étant des nombres réels positifs ou nuls, elles peuvent être classées. On notera $\bar{\sigma}(G)$ la plus grande valeur singulière et $\underline{\sigma}(G)$ la plus petite :

$$\bar{\sigma}(G) = \sigma_1(G(j\omega)) \geq \sigma_2(G(j\omega)) \geq \dots \geq \underline{\sigma}(G) \quad (2.3)$$

Pour un système monovariante, il n'existe qu'une seule valeur singulière, qui est telle que :

$$\bar{\sigma}(G(j\omega)) = \underline{\sigma}(G(j\omega)) = |G(j\omega)| \quad (2.4)$$

norme H_∞ : On définit la norme H_∞ par : $\|G(s)\| = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(G(j\omega))$


 FIGURE 2.1 – Valeurs singulières et norme H_∞ d'une de transfert

2.3 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.

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.

2.4 Principe de la commande H_∞

2.4.1 Théorème des petits gains

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 [12] :

$$\|G_1 G_2\|_\infty < 1 \quad \text{et} \quad \|G_2 G_1\|_\infty < 1 \quad (2.5)$$

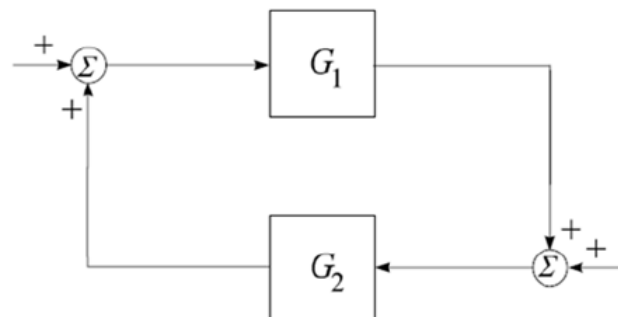


FIGURE 2.2 – Théorème des petits gains : stabilité robuste

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 ΔG et ΔK 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 (2.3), où on a une erreur de perturbation additive :

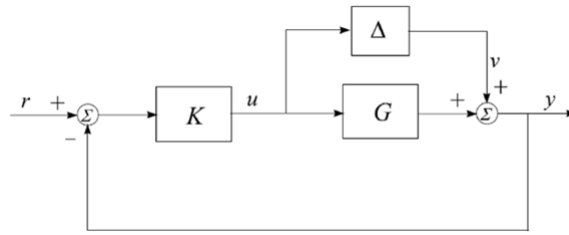


FIGURE 2.3 – Configuration d'une perturbation additive

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 :

$$\|\Delta K(I + GK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (2.6)$$

Ou :

$$\|K(I + GK)^{-1}\|_\infty < \frac{1}{\|\Delta\|_\infty} \quad (2.7)$$

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 ∞ , il est alors clair que nous devons résoudre le problème suivant de minimisation :

$$\min_{K \text{ stabilisation}} \|K(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (2.8)$$

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

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \leq \bar{\sigma}(W_2(j\omega)) \quad \text{pour tout } \omega \in R \quad (2.9)$$

nous pouvons récrire le bloc de perturbation comme :

$$\Delta(s) = \tilde{\Delta}(s)W_2(s) \quad (2.10)$$

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

$$\|W_2K(I + GK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (2.11)$$

Et le problème d'optimisation sera :

$$\min \|W_2K(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad (2.12)$$

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 :

$$S = \|(I + GK)^{-1}\|_\infty \quad T = \|(I + GK)^{-1}GK\|_\infty \quad (2.13)$$

Performances nominales Un asservissement est performant s'il réagit rapidement, rejette les perturbations et suit avec précision la consigne. Compte tenu de l'interprétation des matrices S et T , il est clair que le correcteur T à synthétiser doit chercher à satisfaire maintes exigences :

1. Atténuation des perturbations en sortie : Atténuer les perturbations en sortie revient à minimiser la fonction de sensibilité S , ceci revient à choisir sa norme ∞ la plus faible possible. Soit :

$$\bar{\sigma}(S) = \bar{\sigma}((I_p + GK)^{-1}) = \frac{1}{\underline{\sigma}(I_p + GK)} \leq \frac{1}{\underline{\sigma}(GK)} \quad (2.14)$$

Donc minimiser $\bar{\sigma}(S)$ revient à maximiser $\underline{\sigma}(GK)$.

2. Rejet des bruits de mesure : Pour réduire l'effet des bruits de mesure, il faut choisir :

$$\bar{\sigma}(T) = \bar{\sigma}((I_p + (GK)^{-1})^{-1}) = \frac{1}{\underline{\sigma}(I_p + (GK)^{-1})} \quad (2.15)$$

le plus faible possible, or :

$$\bar{\sigma}(T) = \bar{\sigma}((I_p + (GK)^{-1})^{-1}) \cong \frac{1}{\underline{\sigma}((GK)^{-1})} = \bar{\sigma}(GK) \quad (2.16)$$

Donc minimiser $\bar{\sigma}(T)$ revient à minimiser $\bar{\sigma}(GK)$

3. Poursuite du signal de référence : La poursuite idéale de la référence r par la Sortie y entraîne $I - S \cong I$, soit $\bar{\sigma}(S)$ minimale. Cette condition rejoint donc celle du rejet des perturbations en sortie.

Pour cela on minimise S/T au même temps ce qu'est appelé la sensibilité mixte qui implique la recherche d'un contrôleur K qui minimise :

$$\left\| \begin{array}{c} S \\ T \end{array} \right\|_\infty \quad \text{ou} \quad \left\| \begin{array}{c} (I + GK)^{-1} \\ (I + GK)^{-1}GK \end{array} \right\|_\infty \quad (2.17)$$

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 des performance acceptable, Pour contourner cet obstacle, généralement, dans le cadre de la synthèse, les fonctions de transfert sont pondérées par des filtres, le choix des filtres $w_i(s)$ est très important, il se fait à partir des choix des gabarits, ses derniers étant imposés par le cahier des charges, ils sont dans la plupart des cas soit des filtres passe-bas, soit des filtres passe-haut. Dans certains cas, il est possible de choisir des constantes. Tous les filtres doivent être stables pour pouvoir garantir les hypothèse propre au problème H_∞ , et le problème revient à :

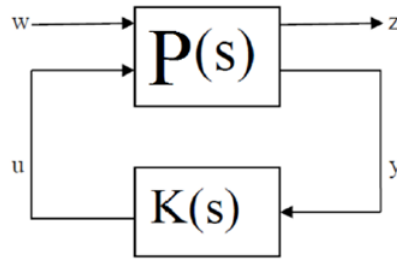
$$\min_{K \text{ stabilisation}} \left\| \begin{array}{c} W1S \\ W2T \end{array} \right\|_\infty \quad \text{ou} \quad \min_{K \text{ stabilisation}} \left\| \begin{array}{c} W1(I + GK)^{-1} \\ W2(I + GK)^{-1}GK \end{array} \right\|_\infty \quad (2.18)$$

Performances robustes : Un système bouclé satisfait le critère de robustesse en performances si les conditions de performances nominales sont vérifiées pour toute une classe de modèles de procédés caractérisés par des incertitudes structurées ou non.

2.4.2 La forme standard de la commande H_∞

le problème H_∞ 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 [2]. 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_∞ est représenté schématiquement dans fig(2.4) :


 FIGURE 2.4 – La forme standard de la commande H_∞

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 :

$$\begin{pmatrix} z \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ u \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

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

$$z = [p_{11} + p_{12}K(I - p_{22}K)^{-1}p_{21}]w = F_1(P, K)w \quad (2.20)$$

Problème H_∞ 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 γ_{opt} et appelé gain (ou atténuation) " H_∞ - optimal " . Le problème sous-optimal associé joue également un rôle important :

Problème H_∞ Sous-optimal

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

2.5 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(2.5) le montre :

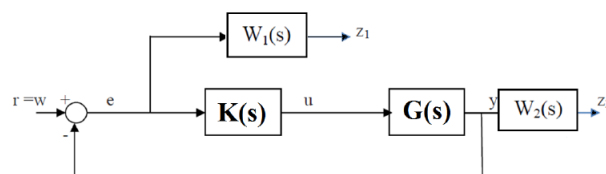


FIGURE 2.5 – mise sous forme standard

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

Ce qui nous permet de poser le système augmenté suivant :

$$P = \begin{pmatrix} W_1 & -W_1 G \\ 0 & W_2 G \\ I & -G \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Avec :

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

2.5.1 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.

2.5.2 Résolution des équations de RICCATI :

Beaucoup d'algorithmes ont été utilisé pour résoudre le problème de commande H_∞ standard, mais le plus utilisé c'est la méthode de Glover-Doyle (G-D) (1988) pour sa simplicité puisqu'il ne requiert que la résolution des deux équations de RICCATI pour obtenir le régulateur optimal K . Ainsi on donne la forme d'état du système augmenté 2.21 comme suit [5] :

$$G = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

Ce qui donne les équations de RICCATI suivantes :

$$\begin{cases} A^T X_\infty + X_\infty A + C_1^T C_1 + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty = 0 \\ Y_\infty A^T + A Y_\infty + B_1 B_1^T + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

Le régulateur K existe si et seulement si la solution unique stabilisante des deux équations de RICCATI sont définies positive et le produit des deux solutions est inférieur au rayon spectral $\lambda_{\max}(X_\infty Y_\infty)$

Ainsi les paramètres du régulateur s'il existe sont donné par :

$$\begin{cases} A_R = A + (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty - (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} Y_\infty C_2^T C_2 \\ B_R = (I - \gamma^{-2} B_1 B_1^T)^{-1} Y_\infty C_2^T \\ C_R = B_2^T X_\infty \end{cases} \quad (2.23)$$

2.5.3 Calcul de la commande

Soit le modèle 1.5 donner au chapitre 1 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= A(x, u)x(t) + B_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

le calcul de la commande passe par deux étapes :

- La linéarisation
- Le choix des pondération

2.5.3.1 La linéarisation

On pose les paramètres suivants :

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

$$\rho_f = 903 \quad C_f = 1820$$

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

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

Comme :

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

Le système 2.24 devient :

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} &= A(x_n, u_n)\Delta x + B(x_n, u_n)\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec :

$$A(x_n, u_n) = \begin{pmatrix} p'_{2n} & \frac{u_n}{A_f \Delta l} & \cdots & 0 & p_{2n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p'_{2n} & \ddots & 0 & 0 & p_{2n} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \frac{u_n}{A_f \Delta l} & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{2n} & 0 & 0 & \cdots & p_{2n} \\ p_{1n} & 0 & \cdots & 0 & p_{0n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{1n} & & 0 & 0 & p_{0n} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{1n} & 0 & \cdots & 0 & p_{0n} \end{pmatrix}, \quad p'_{2n} = -p_{2n} - \frac{u_n}{A_f \Delta l} \quad (2.26)$$

Et :

$$B(x_n, u_n) = \left(\frac{x_{2n} - x_{1n}}{A_f \Delta l} \quad \frac{x_{3n} - x_{2n}}{A_f \Delta l} \quad \cdots \quad \frac{-x_{\frac{N}{2}n} + T_{in}}{A_f \Delta l} \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \right)^T \quad (2.27)$$

Donc on aura la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = C(SI - A)^{-1}B \quad (2.28)$$

2.5.3.2 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 la commande on utilise la fonction **mixsyn** qui est détaillé dans (Robust toolbox matlab [4])

Le correcteur K est :

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

Ce régulateur va générer la commande Δu et la commande finale appliquée sur le système non linéaire sera :

$$u = u_n + \Delta u. \quad (2.29)$$

2.5.4 Simulation

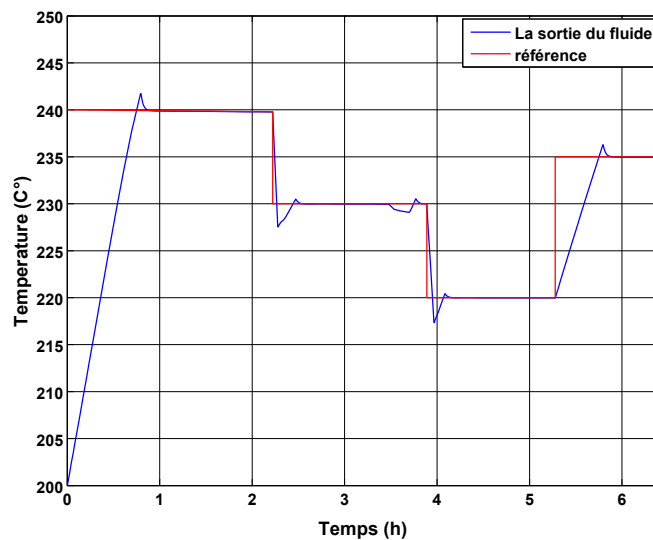


FIGURE 2.6 – Réponse avec la commande H_∞

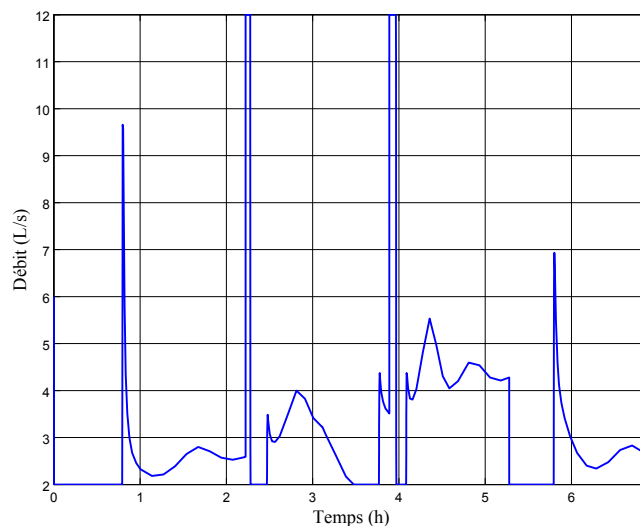
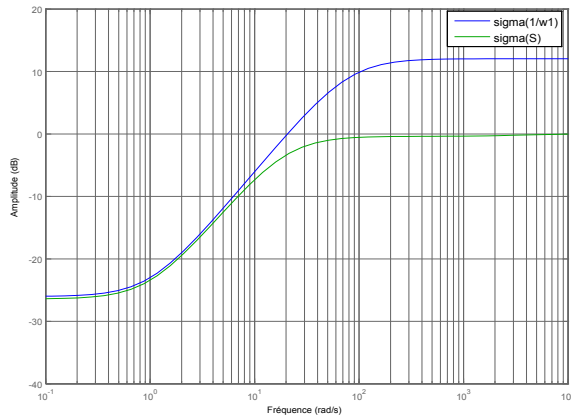
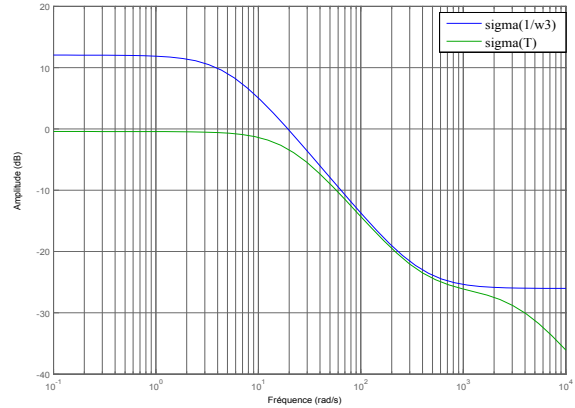


FIGURE 2.7 – La variation de débit


 FIGURE 2.8 – la valeur singulière de la fonction de sensibilité S et $1/W1$

 FIGURE 2.9 – la valeur singulière de la fonction de sensibilité complémentaire T et $1/W2$

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 (2.6) nous montre que 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 C°) sur le modèle non linéaire, la sortie suit la référence (aussi 240 C°) avec 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 référence. Ces résultats nous justifient la robustesse de la commande H_∞ par rapport la linéarisation des non linéarités .

Test de robustesse

Le fluide utilisée dans la station solaire possède plusieurs paramètres qui peut 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 bruité, ce qui a comme conséquence : l'incertitude dans les résultats et la diminution de la precision des paramètres. pour cela, on va changer les paramètres $\rho_f C_f$ pour pouvoir tester la de la commande par mode glissant vis à vis les changement paramétrique.

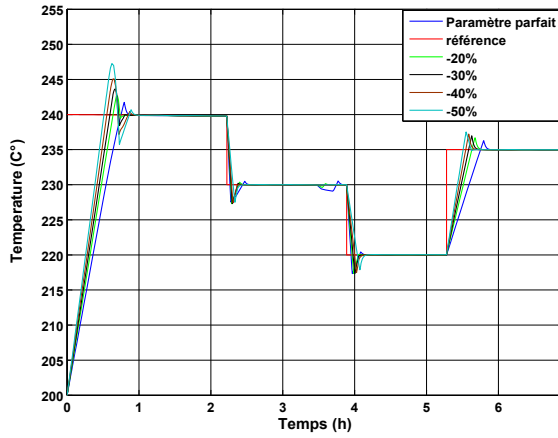


FIGURE 2.10 – La variation de C_f

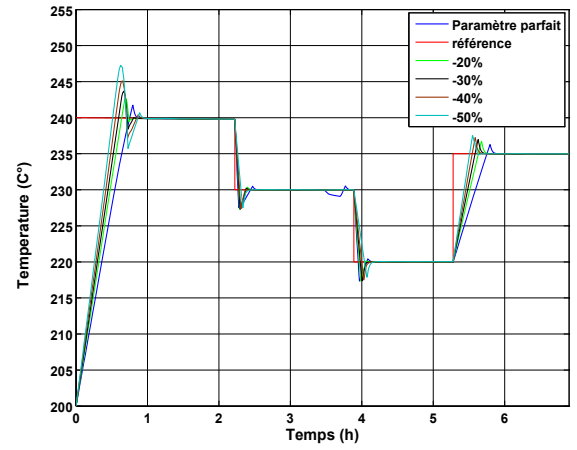


FIGURE 2.11 – La variation de ρ_f

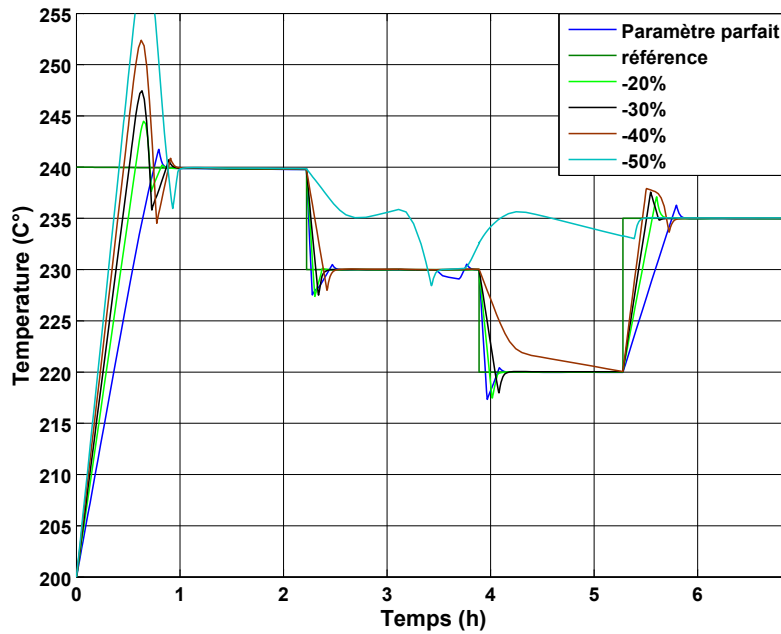


FIGURE 2.12 – La variation de C_f et ρ_f

La réponse suit 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.

B-Commande par mode glissant

2.6 Introduction

Les lois de commande classiques du type PID donnent de bons résultats quand elles sont appliquées à des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires présentant des variations paramétriques ou bien des incertitudes de modélisation, ces lois de commande peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes, surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes.[3] Pour cela on devrait concevoir une commande robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux ces incertitudes sur les paramètres, à leurs variations, 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 .

2.7 Notion commande par mode glissant

La commande par mode glissant est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale de cette commande 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 du système utilisées pour créer une "variété" ou "hypersurface" dite de glissement. Le but est de forcer les états du système à vérifier l'équation de l'hypersurface, c'est à dire, ramener la trajectoire d'état sur cette hypersurface. Ceci se fait en deux phases :

Phase d'approche où la trajectoire d'état se rapproche de la surface de glissement jusqu'à l'atteindre. On l'appelle aussi phase d'attractivité.

Quand l'état est maintenu sur cette hypersurface, le système est dit en régime glissant (**phase de glissement**). 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.

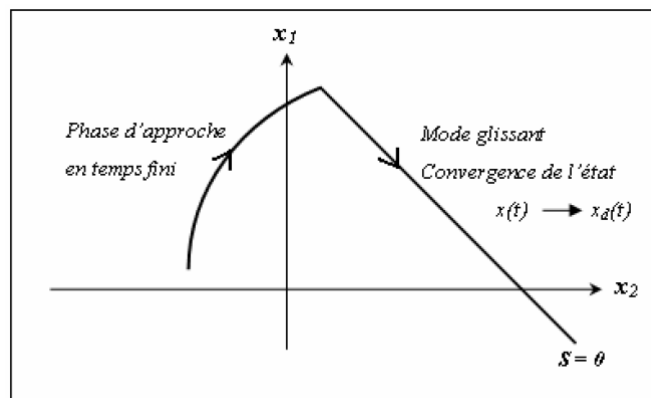


FIGURE 2.13 – Attractivité et maintien de l'état par la surface de glissement

Cette commande possède des avantages incontestables tel que la robustesse (l'insensibilité) vis-à-vis des paramètres variables et les erreurs de discrétisation ce qu'on va le confirmer dans la partie de simulation de ce chapitre. Malheureusement, bien qu'ayant divers avantages, la commande par mode glissant possède également un inconvénient majeur qui a limité sa mise en œuvre au début de son apparition. En effet, si dans la théorie tout semble possible et parfait, dans la pratique, les imperfections telles que les retards de commutation engendrent des oscillations autour de la surface

de glissement pouvant exciter des dynamiques non modélisées, ce phénomène est connu sous le nom de chattering.

2.7.1 Le phénomène de chattering ou réticence

Lors de la commande par la technique des modes glissants, un phénomène dit de réticence se passe, cela à cause de l'effet de commutation de la commande entre deux valeurs, si la fréquence de commutation est infinie c'est-à-dire une commutation très rapide ce phénomène sera réduit, mais à cause des retards et aussi la limitation par la technologie des actionneurs, le phénomène de réticence n'est plus annulé. Le phénomène de réticence provoque alors des fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter des dynamiques non modélisées qui endommagent les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes ou même détériorer l'organe de commande.

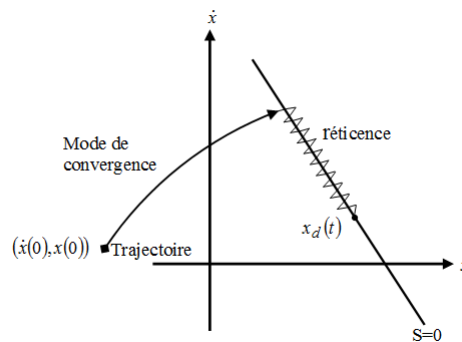


FIGURE 2.14 – Le phénomène de chattering

Par conséquent de ce phénomène indésirable, plusieurs techniques ont été proposées; ce sont des techniques de limitation ou de saturation, sert à définir une zone autour de la surface S où à l'intérieur du quelle une condition de glissement moins stricte est appliquée à la place de la fonction signe.

Pour pour éviter ce problème on utilise la fonction de saturation présenter par **Slotine** tel que :

$$sat(S) = \begin{cases} \frac{S}{\phi} & \text{si } |S| \geq \phi \\ sign(S) & \text{si } |S| \leq \phi \end{cases} \quad (2.30)$$

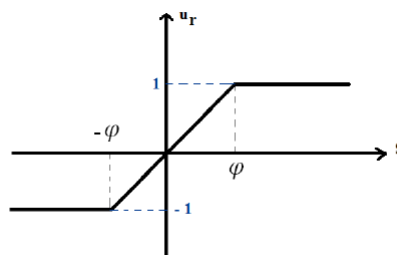


FIGURE 2.15 – La fonction de saturation

La recherche d'une commande par modes glissants nous amène à considérer les trois notions suivantes, très importantes lors de la synthèse d'une MG :

- Choix de la surface de glissement.
- Attractivité de la surface de glissement.
- Invariance du régime glissant vis à vis des incertitudes paramétriques et/ou des perturbations.

2.7.2 Surface de glissement

La commande par modes glissants est calculée suivant la valeur des états du système à chaque instant. Cette loi de commande a pour but de conduire la trajectoire d'état de notre système non linéaire sur une surface pré spécifiée (choisie) et de maintenir cette trajectoire sur cette surface, appelée surface de commutation ou de glissement.

Le choix de cette surface n'est pas systématique mais une structure intéressante à été proposée par **Slotine** en 1990, elle a donné par :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(t) \quad (2.31)$$

- Où :
- x est l'état du système
 - e l'erreur de poursuite : $e(t) = y(t) - y_d(t)$
 - r le degré relatif de la sortie y
 - λ constante positive.

Pour un système multivariable ayant m commandes, on choisit une surface vectorielle :

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

La dynamique réduite sur $S(x, t)$ sera donc de dimension $(n - m)$.

2.7.3 Attractivité de la surface de glissement :

La tâche la plus importante est de synthétiser une commande qui conduira l'état du système sur la surface de glissement, cette phase est appelée phase attractive (reaching mode). Lyapounov propose une approche, déjà utilisée pour l'étude de la stabilité d'un point d'équilibre, sans avoir à résoudre l'équation d'état du système.

Soit $V(x)$ une fonction scalaire, continue et dérivable définie sur un domaine D contenant l'origine. $V(x)$ est dite définie positive si $V(0) = 0$ et $V(x) > 0$. Prenons $V(x) = \frac{1}{2}S(x)^2$ et calculons sa dérivée par rapport au temps, $V(x)$ étant une norme, elle représente une mesure du carré de la distance par rapport à l'origine. $\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x)$ ainsi, en s'assurant que cette dérivée soit strictement négative, la distance caractérisée par $V(x)$ diminuera jusqu'à l'origine c'est à dire que l'état du système sera attiré vers la surface de glissement, d'où le nom d'attractivité. en s'assurant que cette dérivée soit strictement négative, la distance caractérisée par $V(x)$ diminuera jusqu'à l'origine de même pour les états de système.

Prenons $\dot{S}(x) = -k \text{sign}(S)$ k étant une constante strictement positive, ceci nous conduit à avoir $\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x) = -k|S(x)| < 0$ De ce fait on a réalisé l'attractivité. Pour ce faire, considérons le système défini par son équation d'état : $\dot{x} = f(x) + g(x)u$

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x} f(x) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x)u = -k \text{sign}(S) \quad (2.32)$$

D'où la loi de commande :

$$u(t) = \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \left[-\frac{\partial S}{\partial x} f(x) - k \text{sign}(s) \right] \quad (2.33)$$

Sous condition que $\frac{\partial S}{\partial x} g(x)$ soit inversible

2.7.4 Invariance de la surface de glissement

La trajectoire d'état glisse sur la surface lorsqu'on satisfait les deux conditions suivantes : $\dot{S}(x, t) = 0$ pour $S(x, t) = 0$.

Ce mode invariant est assuré par la commande équivalente, qu'on obtient en remplaçant $\dot{S}(x, t) = 0$ et $S(x, t) = 0$ dans l'équation 2.32 :

$$u_{eq} = \left(-\frac{\partial S}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} f(x) \quad (2.34)$$

2.8 développement de la commande sur le collecteur cylindro-parabolique

2.8.1 Le 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 :

$$S = e = y - y_r = x_1 - y_r \quad (2.35)$$

Pour étudier la convergence, on définit la variable S_ϕ :

$$S_\phi = S - \phi \cdot \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (2.36)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{S}_\phi(t) &= S_\phi(t) = 0 & \text{si } |S(t)| \leq \phi \\ \dot{S}_\phi(t) &= \dot{S}(t), |S_\phi(t)| = |S(t)| - \phi & \text{si } |S(t)| > \phi \end{aligned} \quad (2.37)$$

2.8.2 Les conditions d'existence et de convergences d'une surface de glissement

Approche de Lyapounov

On définit la fonction de Lyapounov :

$$V : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$V(S_\phi) = \frac{1}{2} S_\phi^2 \quad (2.38)$$

$$\dot{V}(S_\phi) = S_\phi \dot{S}_\phi \quad (2.39)$$

- * 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 :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S_\phi \dot{x}_1 = S_\phi \left[-p_2 x_1 + p_2 x_{\frac{N}{2}+1} + \frac{u}{A_f \Delta_l} (-x_1 + x_2) \right] \\ &= S_\phi [f(x, t) + g(x, t)u]. \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.8.3 Établissement de la loi de commande

On introduit maintenant la loi de commande :

$$u = \frac{1}{g(x,t)}(-f(x,t) - K.sign(S_\phi)) = u_{eq} + u_r \quad (2.41)$$

Remplaçant dans \dot{V} :

$$\dot{V} = S_\phi \left[f(x,t) + (g(x,t)) \frac{1}{g(x,t)}(-f(x,t) - K.sign(S_\phi)) \right] \quad (2.42)$$

Par conséquent :

$$\dot{V}_1 = S_\phi \dot{S}_\phi \leq -K|S_\phi| \quad \text{Avec : } K > 0. \quad (2.43)$$

La valeur de K détermine la vitesse de convergence.

Par le théorème de Lyapounov, S_ϕ tend asymptotiquement vers 0 ce qui nous donnera asymptotiquement l'inégalité :

$$|S| < \phi \quad \text{donc} \quad |e| < \phi \quad (2.44)$$

2.9 Simulation

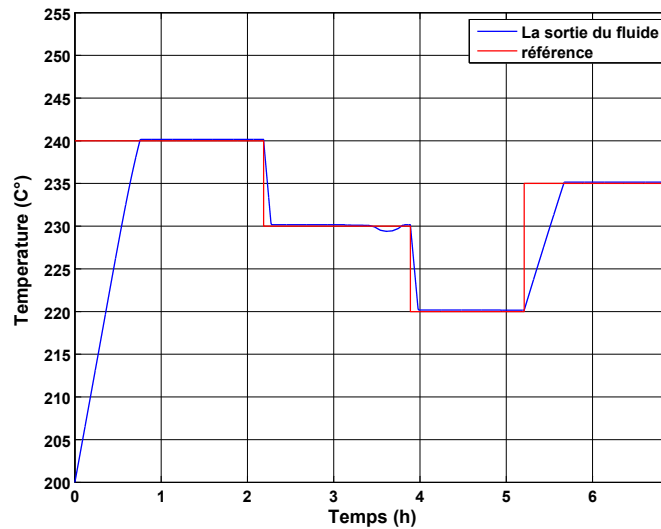


FIGURE 2.16 – Réponse avec la commande par mode glissant

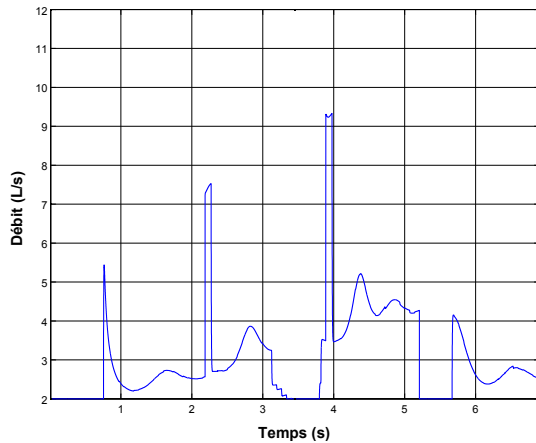


FIGURE 2.17 – La variation de commande

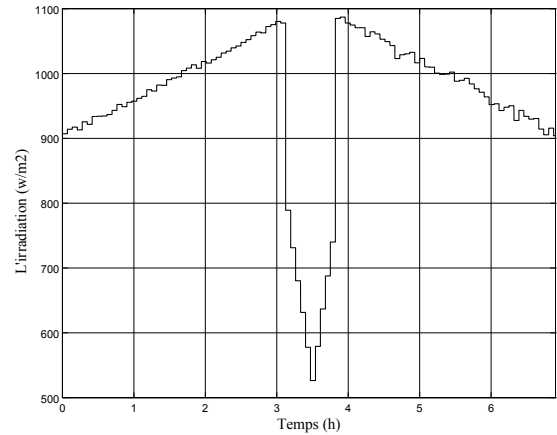


FIGURE 2.18 – L'irradiation solaire

On peut voir dans fig 2.16 qu'on atteint tous les points de fonctionnement, tel que si la référence diminue soudainement (ex : 2.2 h), le débit est augmenté a 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 : 5,2 heure).

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 (robustesse vis-à-vis les perturbation extérieurs).

Test de robustesse : On applique les même test de robustesse vu déjà dans la partie de la commande H_∞ .

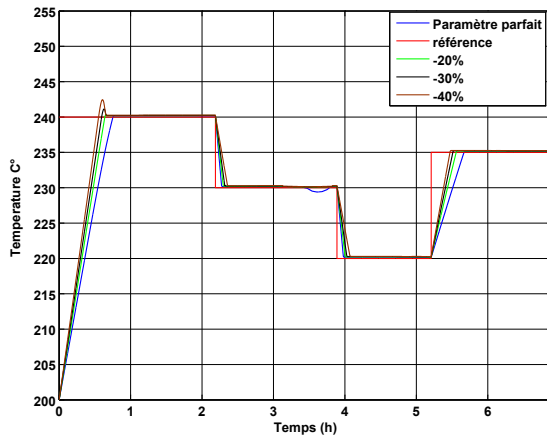


FIGURE 2.19 – La variation de C_f

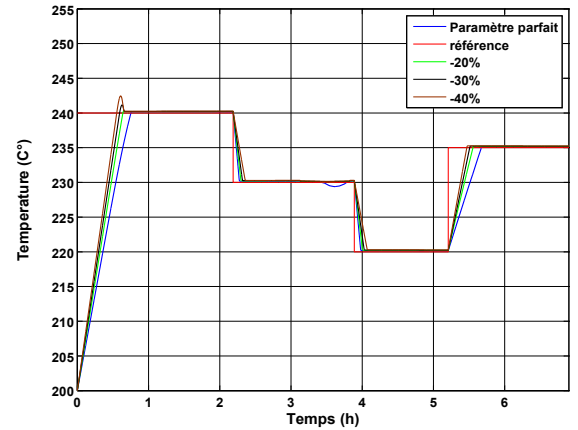


FIGURE 2.20 – La variation de ρ_f

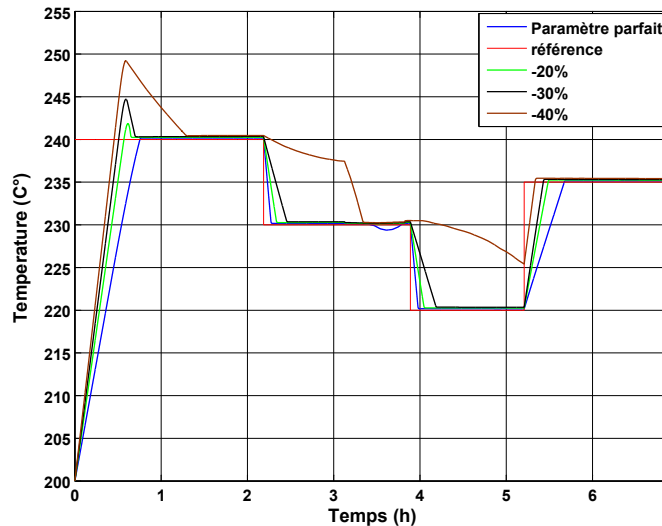


FIGURE 2.21 – La variation de C_f et ρ_f

On a fait des changements paramétriques de - 20%, - 30%, - 40% et -50% sur C_f seul et après sur ρ_f seul et à la fin sur les deux au mémé temps fig 2.21.

Malgré les changements des paramètres(un seul paramétré à la fois) du fluide, le système suit la référence avec une réponse plus lente, mais si on change les deux au même temps ce qui est le vrai cas, on voit que la réponse suit la référence jusqu'à 40 % de variation paramétrique où le système diverge, qui nous conforme la robustesse de cette commande

2.10 Étude comparative entre les différentes stratégies de commande

Nous présentons ici une synthèse sur les commandes appliquée sur une station solaire thermique à base un collecteur cylindro-paraboliques qu'on a utilisé précédemment, on comparant la commande H_∞ et la commande par mode glissant.

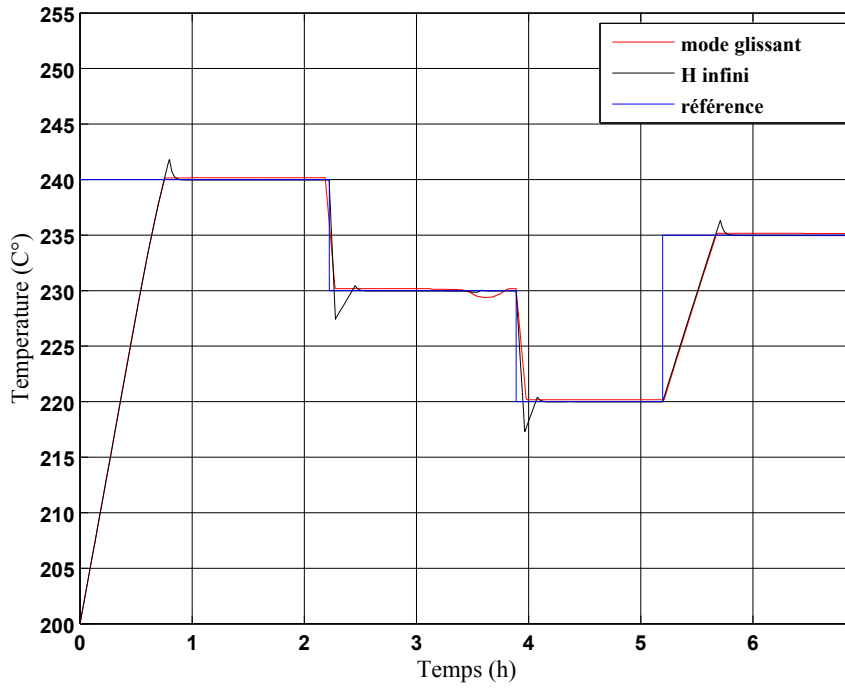


FIGURE 2.22 – la réponse par H_∞ et par mode glissant

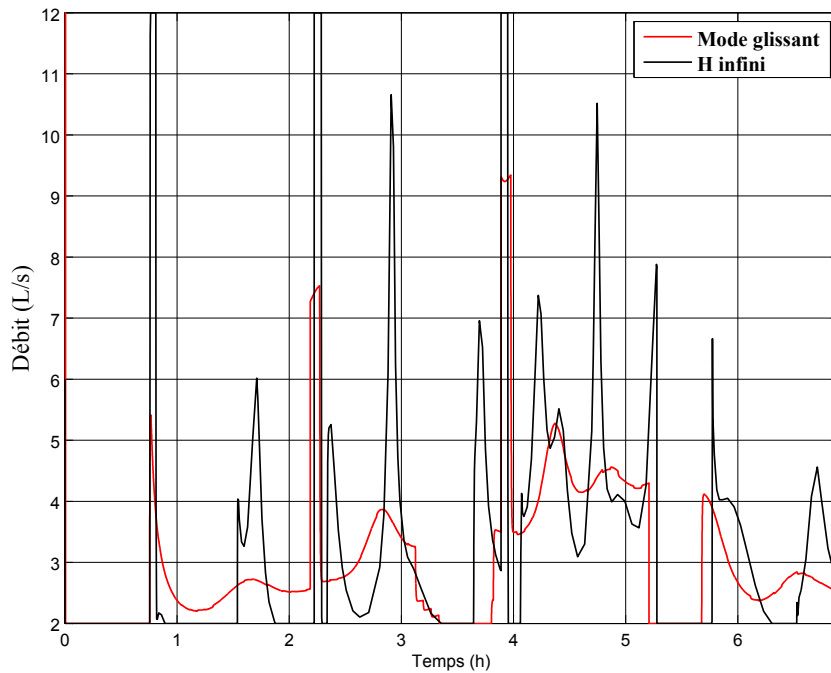


FIGURE 2.23 – La variation de commande par H_∞ et par mode glissant

La fig(2.22) montre que la réponse obtenu par mode glissant est meilleur par rapport à celle de H_∞ , cela apparaît en des petit dépassement.

La fig(2.23) montre les débit des deux commandes, il est remarquable que la commande par mode glissant possédât moins de variation, contrairement au commande H_∞ qui bascule beaucoup entre ses limites.

La comparaison se focalisera sur trois plans :

1. **Les caractéristiques de chaque commande et sa méthode de synthèse.**
 2. **Leurs performances et robustesses.**
 3. **Les condition nécessaire pour l'appliquer et le temps d'exécution.**
1. Pour le premier point, on sait que la commande H_∞ et la commande par mode glissant sont de natures différentes. La première est continue et applicable en général sur les systèmes continus et la deuxième est de nature discontinue ce qui oblige l'organe de commande à travailler à une fréquence de commutation infinie, mais comme celle-ci est impossible il est généralement approximé par des fonctions continues comme *saturation* et *tangent hyperbole*.

-La méthode de synthèse est différente pour chaque commande. Pour appliquer la commande H_∞ , nous avons linéarisé le système non linéaire autour un point de fonctionnement " $x_n u_n$ ", et nous spécifions les performances désirées par l'introduction des filtres de pondération. Et après la résolution des equations de Riccati nous avons appliqué la commande trouvée sur le modèle non linéaire. Par contre, la synthèse de la commande par mode de glissement est basée sur l'utilisation de la théorie des systèmes non linéaires donc elle utilise directement le modèle non linéaire.
 2. Pour le deuxième point, d'après les simulations et l'étude des performances/robustesse pour chaque commande, nous tirons que la commande par mode glissant nous permet d'avoir des performances intéressantes en termes de précision et du régime transitoire par rapport à la commande H_∞ car elle utilise des informations retenues directement à partir de système non linéaire contrairement à la commande H_∞ . En revanche la commande H_∞ montre qui elle est plus robuste vis-à-vis les changements paramétriques.
 3. Pour le troisième et dernier point, la commande par mode de glissement nécessite une connaissance sur les états donc on devrait concevoir un observateur ce qui complique la tâche. Ce n'est pas le cas pour la commande H_∞ qu'utilise seulement la sortie mesure.

-Le temps de calcul pour l'algorithme de H_∞ est plus grand par rapport à la commande par mode glissant.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux commandes robustes "*mode glissant*" et " H_∞ ". Commenant par expliquer leur idée générale et leur principe, et après ont l'appliquer sur notre système et on fait plusieurs tests de robustesse. On termine par une étude comparative montrent les caractéristiques de chaque commande et sa méthode de synthèse, leurs performances et robustesse, et les conditions nécessaires pour l'application de chaque commande et le temps d'exécution.

Conclusion générale

Les stations solaires thermiques sont l'une des solutions récentes dans l'industrie. Elle contient plusieurs avantages comme : possibilité de stockage thermique, hybridation, rendements de conversion solaire-électricité supérieure aux procédés photovoltaïques, et forts potentiels de réduction des coûts.

Dans le premier chapitre nous avons donné une description générale de la chaîne étudiée, commençant par le principe de fonctionnement ainsi, les différents types suivis par une modélisation dans l'espace d'état.

Dans le deuxième chapitre on a entamé la partie commande, introduisant la première commande " H_∞ ", expliquant son utilité, et donnant l'idée générale et les étapes de synthèses suivies par des tests de robustesse et d'une simulation. Les résultats obtenus, montrent la robustesse de cette commande vis-à-vis de l'erreur due à la linéarisation et le changement paramétrique.

Après nous introduisant la deuxième commande robuste "mode glissant", en commençant par donner sa notion avec les étapes d'application, ensuite, nous avons appliquée sur notre système, et on fait des tests de robustesse. Le développement fait a été validé par une simulation.

On termine ce travail par une étude comparative entre les différentes commandes appliquées montrant les avantages et les inconvénients de chacun par rapport à l'autre, nous tirons que la commande par mode glissant nous permet d'avoir des performances intéressantes en termes de précision et du régime transitoire par rapport à la commande H_∞ , autrement, elle nécessite des informations sur les états, pour cela nous devons construire des observateurs ce qui complique la tâche. En revanche la commande H_∞ montre qu'elle est plus robuste vis-à-vis des changements paramétriques, et elle ne nécessite pas des informations sur les états.

Bibliographie

- [1] E.F. Camacho A.J. Gallego. *"Estimation of effective solar irradiation using an unscented Kalman filter in a parabolic-trough field "*, Solar Energy 86. 2012.
- [2] P. Apkarian. *"éléments de la théorie de la commande robuste"*.
- [3] B. Atik et M.Alma. *"Commande à base d'observateurs d'état non linéaires d'un simulateur d'hélicoptère"*, Projet de fin d'études, ENP alger. 2006.
- [4] G. Balas et al. *"Robust Control Toolbox For Use with MATLAB "*, guide, MathWorks. 2005-2006.
- [5] M. Bouguerrouche et K HAMICHE. *"Commande d'un Système de Dessalement d'Eau de Mer par Osmoses Inverse"*, Projet de Fin d'étude, École Nationale Polytechnique Alger. 2014.
- [6] E.F. Camacho et F.R. Rubio. *"A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part II "*, Solar Energy 81. 2007.
- [7] E.F. Camacho et M. Berenguel. *"Advances in Industrial Control"*, Springer, 1997.
- [8] C.M. Cirre. *"Application of Predictive Sliding Mode Controllers to a Solar Plant "*, IEEE Transactions on control systems technology, vol, 16, no, 4. 2008.
- [9] G. Duc et S.Font. *"Ccommande H_∞ et μ -analyse"*, Livre,Collection pédagogique d'automatique.
- [10] Bennamia et Salamani. *"Commandes Robustes Appliquées à la Stabilisation d'un Navire"*, Projet de Fin d'étude, École Nationale Polytechnique Alger. 2007.
- [11] A.J. Gallego et E.F Camacho. *"Observer-based Model Predictive Control of a parabolic-trough eld"*. Solar Energy (97). 2013.
- [12] D.W. Gu et P.Hr. petkov. *"Robust control design with MATLAB"*. Springer. 2005.
- [13] 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.
- [14] B. Khoukhi. *"Modélisation et commande d'un système solaire thermique-dessalement eau de mer"*. Projet de Fin d'étude, École Nationale Polytechnique Alger. 2013.
- [15] 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.
- [16] M.S. Mahgoun. *"Application de la commande H-infini aux systèmes linéaires perturbée"*. Thèse de Magister université ferhat abbass. 2012.
- [17] EM. Pasamontes et J.D. Alvarez. *"Hybrid modeling of a solar-thermal heating facility "*, Solar Energy 97. 2013.

- [18] G. Pina et M. Falchettab. "*Adaptive time-warped control of molten salt distributed collector solar fields* ", Control Engineering Practice 16. 2008.
- [19] S. Quoilin. "*Les Centrales Solaires à Concentration*". Université de Liège, 2002.