

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla



**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la
Communication**

Département d'Electronique et des Télécommunications

Mémoire MASTER

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et système

Présenté par :

CHEHAM Abdeldjalil

EL MAGBED Seddik

Thème

**Commande robuste d'un concentrateur
solaire cylindro-parabolique**

Devant le jury:

Mr BECHKA Larbi

MAA

UKM Ouargla

Président

M^{eme} KARA Fouzia

MAA

UKM Ouargla

Examineur

Mr HAMZA Azzedine

MAA

UKM Ouargla

Encadreur

Dr MOSBAH Charaf Abdelkarim

Chef de projet

SONELGAZ

Co-encadreur

Année Universitaire: 2017 / 2018

Remerciements

Avant tout, nous remercions, Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience, et la sante durant toutes ces longues années d'études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **Mr HAMZA Azzedine**, pour sa confiance en nos capacités et pour son soutien continu à nous.

Nous aimerions particulièrement à remercier notre Co-encadreur, **Dr Charaf Abdelkarim MOSBAH**, pour les nombreux conseils et discussions qui ont orienté nos recherches au cours de ce mémoire , aussi pour la qualité de son encadrement et sa constante disponibilité. Nous avons eu le privilège de bénéficier de tous ses précieux conseils dans le domaine de l'Automatique tout au long de l'élaboration de notre mémoire, de son soutien et ces qualités humaines, qui nous ont aidés dans la réalisation de ces travaux de mémoire.

Nous remercions, tout organe Département d'électronique et des télécommunications de OUARGLA.

Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin,ce remerciement serait incomplet sans des remerciements affectueux, pour nos familles, pour leur appui, leur patience et leur grande compréhension.

Merci

ملخص:

لم تعد الطاقات المتجددة تمثل بديلاً للوقود الأحفوري، بل أصبحت حتمية مفروضة في ظل إرتفاع الطلب على الطاقة و محدودية الموارد. نهدف من خلال هذا العمل إلى دراسة مشكل التحكم في نظام تحويل الطاقة بمحطة الطاقة الشمسية الحرارية. تمثل الدافع الرئيسي لهذه الدراسة في حاجتنا لتقنية فعالة للتحكم بدرجة حرارة جمع الطاقة الشمسية الأسطوانية المكافئ. بعد طرحنا للإشكالية، عملنا على تطوير نموذج رياضي باستخدام قوانين إحتفاظ الطاقة. بعد ذلك، إعمدنا على طريقتين مختلفتين في توليف قوانين التحكم. من أجل تقييم أداء الطرق المقترحة قدمنا إختبارات كفاءة تحت ظروف عمل مختلفة بإستعمال المحاكاة العددية.

الكلمات المفتاحية: جمع الطاقة الشمسية الأسطوانية المكافئ، التحكم الإنزلاقي، التحكم التنبؤي

Résumé :

Les énergies renouvelables ne représentent plus une alternative aux énergies fossiles, mais une fatalité imposée par la hausse demande énergétique ainsi que la limitation des ressources. Le but de cette étude est le controle d'un système de conversion d'énergie dans une centrale solaire thermique. La principale motivation qui a fait l'objet de ce travail est la nécessité d'une technique efficace pour contrôler la température de sortie du concentrateur solaire cylindro-parabolique. Une fois la problématique posée, on s'est penché sur l'élaboration d'un modèle mathématique en utilisant les lois de conservation d'énergie. Ensuite, deux approches de commande différentes ont été adoptées pour la synthèse des lois de commande. Finalement, nous avons évalué les performances des méthodes proposées à travers des tests de simulations en utilisant de vrais paramètres du système sous différentes conditions de fonctionnement.

Mots-clés : Concentrateur solaire cylindro-parabolique, commande par mode de glissement, commande prédictive.

Abstract :

Renewable energies are no longer considered as an alternative for fossil fuels, but a fatality imposed by growing energy demand and resources limitation. The aim of this study is the control of an energy conversion system in a solar thermal power station. The main motivation behind the subject of this work consist in the need for an efficient technique to control the outlet temperature of the parabolic solar collector. Once the problem was posed, we worked on the development of a mathematical model using energy conservation laws. Then, two different control approaches were adopted for the control laws synthesis. Finally, the performances of the proposed methods are evaluated with simulation tests using real system parameters, and under different functioning conditions.

Keywords : Parabolic solar collector, sliding mode control, predictive control.

Table des matières	v
Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
introduction Générale	1
1 État de l’art sur les centrales solaires thermiques	3
État de l’art sur les centrales solaires thermiques	3
1.1 Introduction	4
1.2 Descriptions des différentes technologies de l’énergie solaire	4
1.2.1 Technologie photovoltaïque	4
1.2.2 L’énergie solaire thermique	5
1.3 Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque	6
1.4 Différents types des centrales solaires thermiques	7
1.4.1 Centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique	8
1.4.2 Centrale solaire à tour	8
1.4.3 Centrales solaires à miroirs de Fresnel	9
1.4.4 Centrales à concentrateurs paraboliques	10
1.5 Fluides caloporteurs	10
1.6 Stockage thermique	11
1.6.1 En fabricant de l’hydrogène	11
1.6.2 Dans du sel fondu	11
1.7 conclusion	13
2 Problématique et modélisation du concentrateur cylindro-parabolique	14

4.4	Résultats de simulation	42
4.4.1	Test 1 : (Influence de l'horizon de prédiction)	42
4.4.2	Test 2 : (Poursuite de Référence)	43
4.4.3	Test 3 : (Robustesse du Contrôleur)	43
4.5	Étude comparative	43
4.6	Conclusion	48
	Conclusion générale et perspectives	49
A	ANNEXE A : Paramètres du Concentrateur Solaire Cylindro-Parabolique	51
	Bibliographie	55

TABLE DES FIGURES

1.1	Distribution mondiale de l'énergie solaire	4
1.2	Principe du photovoltaïque	5
1.3	Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique	6
1.4	Production de l'énergie solaire thermique	6
1.5	Différents types des concentrateurs solaires	7
1.6	Synoptique du principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermique	7
1.7	Concentrateurs cylindro-paraboliques	8
1.8	Synoptique d'une centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique	8
1.9	Tour solaire	9
1.10	Synoptique d'une centrale solaire à tour.	9
1.11	Concentrateur solaire à miroirs de Fresnel	10
1.12	Centrale à concentrateur parabolique	10
1.13	Principe d'utilisation du fluide caloporteur	11
1.14	Synoptique d'une centrale solaire qui utilise la production de l'hydrogène pour le stockage de l'excès d'énergie	12
1.15	Centrale solaire Gémasolar (Solar Tres), Andalousie (Espagne)	12
1.16	Schéma illustrant l'utilisation du sel fondu comme fluide caloporteur et support de stockage thermique	13
2.1	Constituants d'une centrale solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique	16
2.2	(a) :Installation à retour direct, (b) :Installation à retour indirect, (c) :Installation à alimentation centralisée	16
2.3	Concetrateur Solaire Cylindro-Parabolique	17
2.4	Volume de Contrôle	19
2.5	Simulation en boucle ouverte	23
3.1	Réduction du problème de chattering	30
3.2	Performance de poursuite des commandes par mode de glissement	31

3.3	Signaux de commande	32
3.4	Évolution de la température le long du tube récepteur	33
3.5	Test de robustesse	34
4.1	Influence de l'horizon de prédiction sur la dynamique de poursuite	42
4.2	Performance de poursuite des commandes prédictives	44
4.3	Signaux de commande	45
4.4	Évolution de la température le long du tube récepteur	46
4.5	Test de robustesse	47

LISTE DES TABLEAUX

4.1 Paramètres de simulation	42
4.2 Comparaison des différentes commandes selon leurs performances	48
A.1 Paramètres du concentrateur solaire cylindro-parabolique	51

CES dernières années, la tendance économique mondiale est orientée vers des stratégies durables basées sur des ressources inépuisables. Les énergies renouvelables, en particulier, sont devenues le défi du 3^{ème} millénaire, car elles sont les poumons de la vie quotidienne. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie solaire qui renferme une vraie opportunité pour se débarrasser de la dépendance aux énergies fossiles vue le grand potentiel mondial des zones ensoleillées qui tiennent une radiation solaire moyenne de 1500 w/m^2 .

Ce projet de fin d'étude constitue une continuité aux différents travaux menés sur les thèmes de contrôle des systèmes d'énergie renouvelable et les concentrateurs solaires en particulier. Dans ce travail on a étudié le problème de commande de la température de sortie du concentrateur solaire cylindro-parabolique (CSCP). Le CSCP est un système qui assure la conversion d'énergie solaire en énergie thermique dans une centrale solaire-thermique. Pour cela, nous avons essayé d'intégrer d'autres visions de commande pour ce système ainsi que d'autres améliorations, comme ça va suivre.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la description de la technologie des centrales solaires thermiques et leurs principes de fonctionnement. Pour cela, nous donnons un bref état de l'art sur les différents concepts des centrales solaires thermiques et nous présentons les différents types des concentrateurs solaires.
- Dans le deuxième chapitre, un intérêt particulier sera consacré au concentrateur solaire cylindro-parabolique. Dans un premier lieu, on va présenter le problème qui a fait l'objet de ce travail. Par la suite, nous établissons le modèle dynamique de ce système, puis, nous simplifions ce dernier afin de faciliter sa commande.
- Dans le troisième chapitre, on va utiliser des techniques de commande basée sur l'analyse de stabilité par méthode de Lyapunov. Pour cela, on commence par donner quelques notions théoriques sur la synthèse de ces lois de commandes. Par la suite, on va les ap-

pliqués sur notre système. Finalement, la validité des commandes proposées est prouvée par des tests de simulation.

- Dans le quatrième chapitre, on propose d'utiliser des techniques de commande basée sur l'optimisation pour atteindre l'objectif de commande. Pour cela, nous donnons l'idée générale et les étapes de synthèses, suivie par son application au concentrateur cylindro-parabolique. Finalement, la validité des commandes proposées est prouvée par des tests de simulation.
- En Annexe A, nous donnons les paramètres de modèle utilisés pour la simulation.

Ce manuscrit s'achève par une conclusion discutant les résultats obtenus et proposant quelques perspectives à prendre en considération.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART SUR LES CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES

"Le bonheur est parfois caché dans l'inconnu "

Victor Hugo

Sommaire

1.1 Introduction	4
1.2 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire	4
1.2.1 Technologie photovoltaïque	4
1.2.2 L'énergie solaire thermique	5
1.3 Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque	6
1.4 Différents types des centrales solaires thermiques	7
1.4.1 Centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique	8
1.4.2 Centrale solaire à tour	8
1.4.3 Centrales solaires à miroirs de Fresnel	9
1.4.4 Centrales à concentrateurs paraboliques	10
1.5 Fluides caloporteurs	10
1.6 Stockage thermique	11
1.6.1 En fabricant de l'hydrogène	11
1.6.2 Dans du sel fondu	11
1.7 conclusion	13

1.1 Introduction

LA notion du développement durable est fortement liée au domaine des énergies renouvelables car toutes les activités humaines sont basées sur l'énergie, aujourd'hui la plus part de cette énergie vient des ressources fossiles qui sont épuisables, de plus ces énergies sont polluantes et les émissions de CO_2 ont noirci la planète, les causes n'entrent pas dans notre propos mais plutôt les solutions [1]. Les solutions sont divers et parmi ces solutions on trouve l'énergie solaire, un véritable alternatif qui peut remplacer au long terme les énergies fossiles car le soleil seul fourni en une heure notre consommation en un an. Dans beaucoup de régions



FIGURE 1.1: Distribution mondiale de l'énergie solaire[1]

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

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

1.2 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire

1.2.1 Technologie photovoltaïque

Comme son nom indique, cette technologie est basée sur l'effet photovoltaïque qui est composé par photo-volt, ce qui signifie la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905. Son principe peut être illustré par une simple

diode qui fonctionne en inverse où le champ intrinsèque fait migrer les électrons de la jonction p vers la jonction n, cela est possible grâce à l'effet photovoltaïque qui permet la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, ces électrons vont constituer le courant qui traverse les cellules du panneau photovoltaïque, donc le rôle de la lumière c'est l'augmentation du nombre des électrons disponibles à la conduction électrique et non pas la conduction électrique. Ces électrons proviennent des atomes du dopage (Phosphore, Bore), l'utilisation des semi-conducteurs est nécessaire pour la fabrication des panneaux photovoltaïques vue leurs conductivité moyenne.

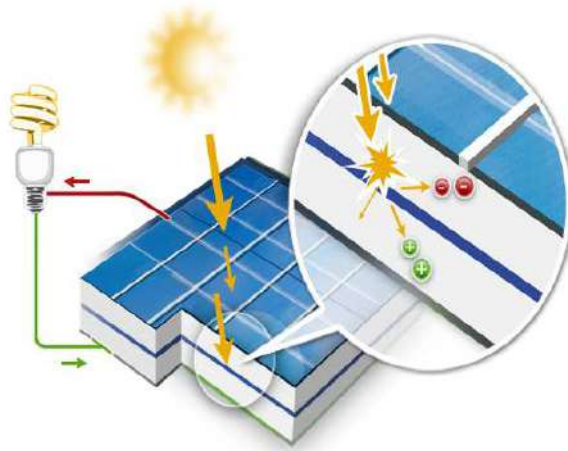


FIGURE 1.2: Principe du photovoltaïque [2]

1.2.2 L'énergie solaire thermique

Ces dernières années, la filière du solaire thermique semble la plus prometteuse parmi les différents technologies de la génération d'énergie à partir du soleil vue l'adéquation qu'elle offre cette technologie pour la production de l'énergie en grande échelle. Cette adéquation est issue du coût qui diminue avec la capacité de production des centrales solaires thermiques, cette filière fournira 10 % de la production mondiale de l'énergie renouvelable à l'horizon de 2050 selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA).

L'Agence Internationale de l'énergie prévoit des sérieuses perspectives pour l'énergie solaire thermique (CSP, Concentrating Solar Power), environ 2000 TW/h sera produite annuellement par la technologie du solaire thermique à 2050. En plus le solaire thermique va continuer à se développer après l'an 2050 chose qui n'est pas valable pour l'énergie hydraulique, en fait le solaire thermique a fait déjà ces preuves et de nombreuses centrales sont opérationnelles dans plusieurs pays dont les leaders sont l'Espagne et les états-Unis. Cette technologie présente la meilleure solution pour le bassin méditerranéen et surtout le nord-africain les pays comme l'Algérie le Maroc et la Lybie ont un immense potentiel de production dans ce do-

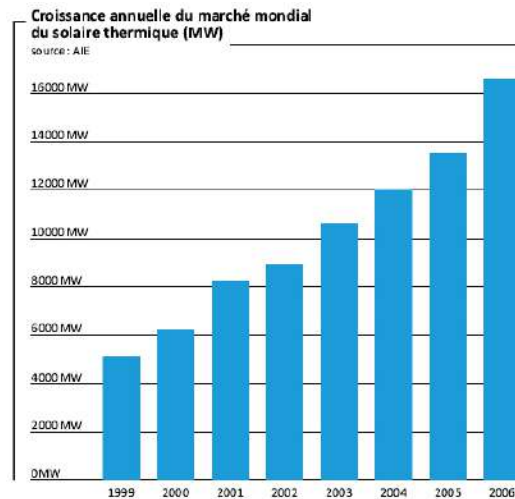


FIGURE 1.3: Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique[3]

maine.

Ces pays ont une capacité de production moyenne de $32 \text{ MW}/\text{km}^2$, ce qui rend cette région la plus favorable pour des investissements dans les centrales solaires thermiques [2].

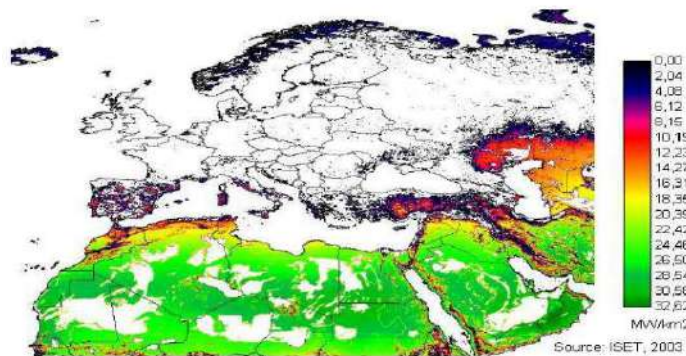


FIGURE 1.4: Production de l'énergie solaire thermique

1.3 Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque

En fait aucune de ces deux technologies n'est dominante par rapport à l'autre actuellement, car chaque technologie a ces propres avantages. Pour le photovoltaïque il préfère la production en petite et moyenne échelle ce qui est le contraire pour le solaire thermique qui s'adapte mieux avec la production en grande échelle pour des capacités allant de 10 MW jusqu'à 100 MW , le photovoltaïque a aussi l'avantage pour les zones rurales là où l'installation d'un réseau électrique serait très coûteuse. D'autre part le solaire thermique présente un avantage très important qui est le stockage de l'énergie à travers des réservoirs de sel fondu, une chose difficile avec le photovoltaïque, de plus le solaire thermique offre un coût de production plus faible que le photovoltaïque pour les endroits où l'ensoleillement est important. Et

dernièrement la technologie du solaire thermique a une durabilité plus importante que les panneaux solaires vue la possibilité de la maintenance et une durée de vie des miroirs relativement élevée [3].

1.4 Différents types des centrales solaires thermiques

Il y a quatre grandes familles de technologie de concentration solaire, en conséquence, quatre types des centrales solaires thermiques. Les centrales solaires à concentrateur cylindro-paraboliques sont les plus développées et dominant clairement le marché. Dans ce genre de systèmes, la concentration du rayonnement sur un seul foyer permet d'obtenir une haute température [4].

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

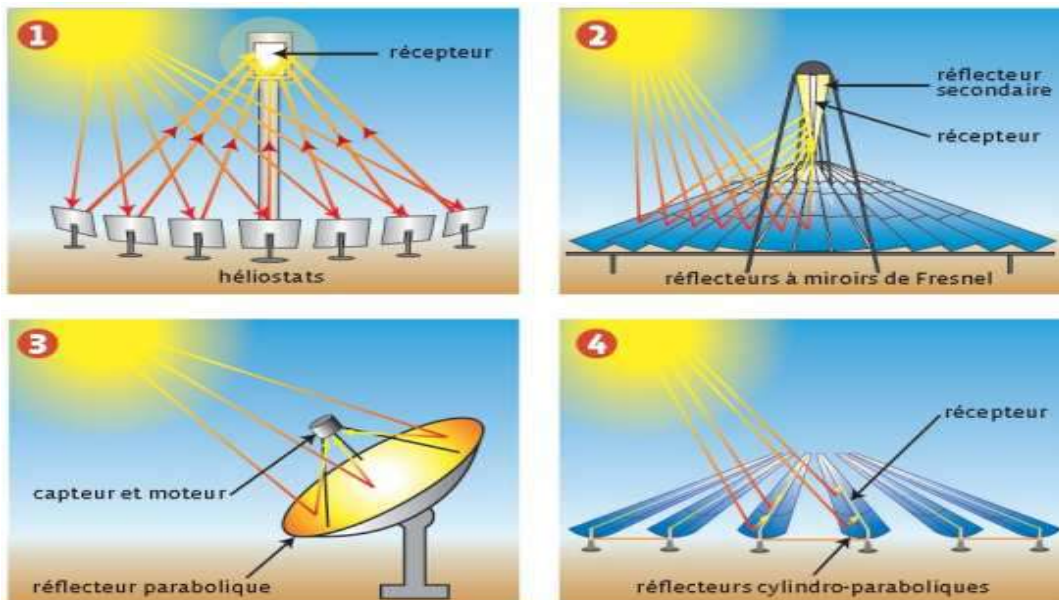


FIGURE 1.5: Différents types des concentrateurs solaires[3]

1.4.1 Centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique

La technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80 [5].

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

L'énergie thermique reçue au concentrateur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur

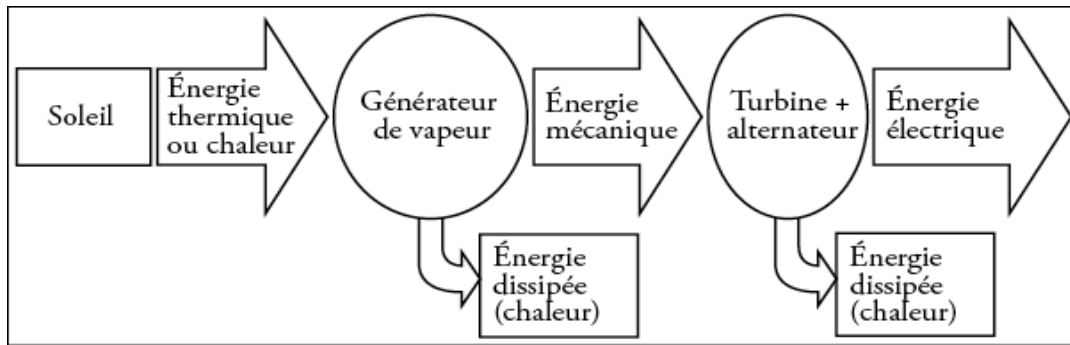


FIGURE 1.6: Synoptique du principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermique[5]



FIGURE 1.7: Concentrateurs cylindro-paraboliques[1]

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

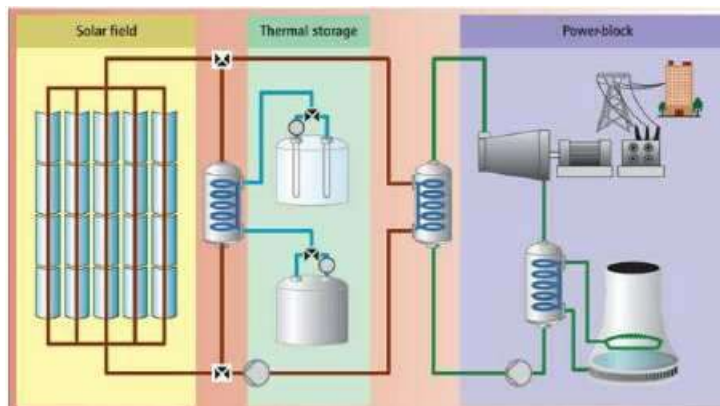


FIGURE 1.8: Synoptique d'une centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique[17]

1.4.2 Centrale solaire à tour

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de la tour solaire par rapport

aux concentrateurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un récepteur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800°C à 1000°C [5].



FIGURE 1.9: Tour solaire[3]

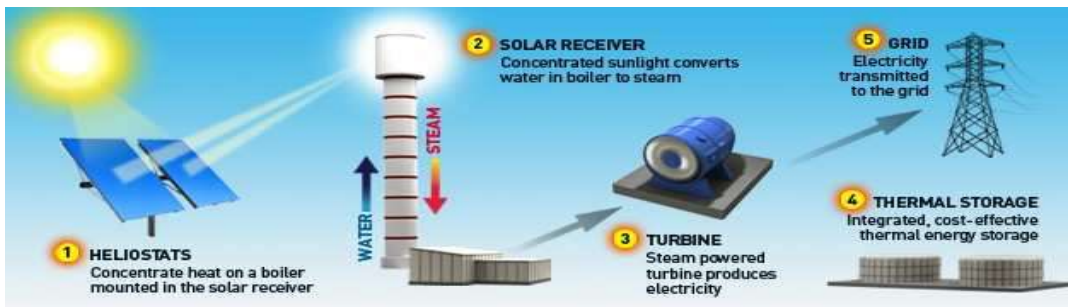


FIGURE 1.10: Synoptique d'une centrale solaire à tour[5]

1.4.3 Centrales solaires à miroirs de Fresnel

Il existe un facteur de coût important dans la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques et la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherches travaillent sur des prototypes de concentrateurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du concentrateur par une succession de miroirs plans. La Figure (1.11) montre un concentrateur de Fresnel [6].

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



FIGURE 1.11: Concentrateur solaire à miroirs de Fresnel[2]

concentrateurs traditionnels sont :

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

1.4.4 Centrales à concentrateurs paraboliques

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



FIGURE 1.12: Centrale à concentrateur parabolique[3]

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

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

1.5 Fluides caloporteurs

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

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

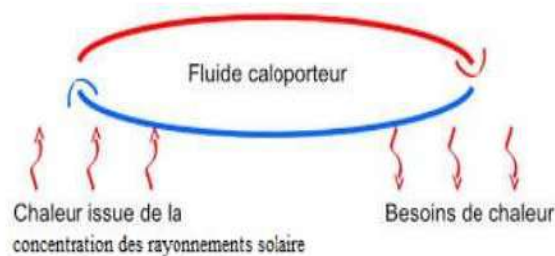


FIGURE 1.13: Principe d'utilisation du fluide caloporteur[2]

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

1.6 Stockage thermique

1.6.1 En fabricant de l'hydrogène

Avec les centrales solaires on peut envisager de produire de l'hydrogène par thermolyse de l'eau. Les molécules d'eau sont cassées à très haute température et libère des atomes d'hydrogène et d'oxygène que l'on sépare. Des systèmes à catalyseurs permettent de baisser la température de cette thermolyse. L'hydrogène pourra remplacer à terme le gaz naturel avec comme principal risque, l'explosion. Lorsqu'il est mélangé à l'air dans des proportions comprises entre 4 et 75% du volume, l'hydrogène est explosif et l'énergie nécessaire à l'inflammation du mélange est extrêmement basse. La figure (1.14) présente un synoptique d'une centrale solaire qui fabrique l'hydrogène pour le stockage de l'excès d'énergie.

Une centaine de stations-service existent déjà dans le monde notamment aux états-Unis où l'état de Californie a lancé un grand projet d'autoroute équipée de station-service à hydrogène. En mars 2005, déjà 16 stations étaient installées pour 95 véhicules. En 2010, 2000 véhicules sont prévus avec 100 stations-service [7].

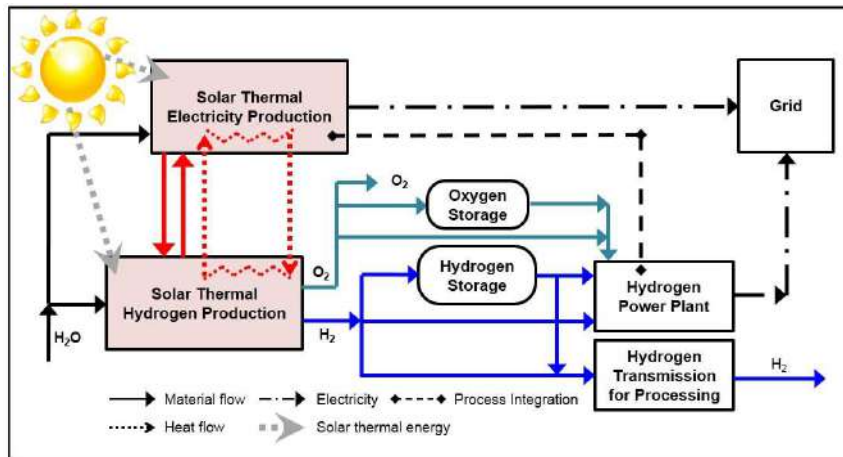


FIGURE 1.14: Synoptique d'une centrale solaire qui utilise la production de l'hydrogène pour le stockage de l'excès d'énergie[6]

1.6.2 Dans du sel fondu

Pour s'affranchir de l'intermittence, le stockage de la chaleur dans du sel fondu a été choisi dans la centrale Gémasolar¹. Concrètement, 2.650 héliostats, des miroirs de 110m² qui suivent la course du soleil, répartis sur 185 hectares font converger les rayons solaires vers un réceptacle situé au sommet d'une tour de 140 mètres. Torressol annonce que 95% de l'énergie calorifique est concentrée sur le réceptacle, qui atteint une température de 900°C. cette chaleur est transmise aux sels fondus qui sont portés à 565°C.

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

Autre atout : avec les sels fondus, le solde de l'énergie non utilisée en journée peut être stocké dans un réservoir pour alimenter l'échangeur thermique de nuit. Quand le solaire photovoltaïque ne fonctionne que de jour, la centrale Gemasolar peut produire de l'électricité de jour comme de nuit. Ainsi, le 4 juillet 2011, la centrale a réussi pour la première fois à produire de l'électricité pendant 24 heures sans interruption [7].

1.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu un état de l'art sur les centrales solaires thermiques, leurs principes de fonctionnement et ses différentes technologies. Puis on a classifié les différents types des stations solaires thermiques. En fin, nous avons présenté le système de stockage de l'énergie thermique.

1. La centrale solaire à concentration **Solar Tres**, appelée aussi **Gemasolar**, est une centrale solaire d'une puissance de 19,9 MW électriques, située à l'ouest de la ville de Écija, en Andalousie (Espagne)



FIGURE 1.15: Centrale solaire Gémasolar (Solar Tres), Andalousie (Espagne)[7]

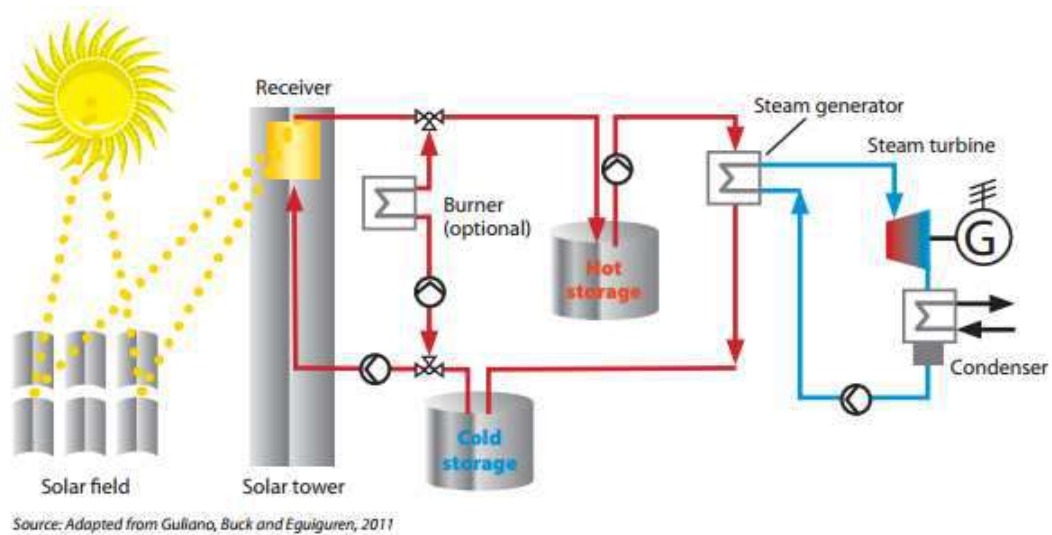


FIGURE 1.16: Schéma illustrant l'utilisation du sel fondu comme fluide caloporteur et support de stockage thermique[5]

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET MODÉLISATION DU CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE

"La valeur d'un homme tient dans sa capacité à donner et non dans sa capacité à recevoir."

Albert Einstein

Sommaire

2.1	Introduction	15
2.2	Centrale solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique	15
2.3	Principe de fonctionnement du concentrateur cylindro-parabolique	16
2.4	Problème de commande	17
2.4.1	Méthode Empirique	18
2.4.2	Méthode d'asservissement	18
2.5	Modélisation du comportement dynamique du CSCP	19
2.6	Préliminaires et formulation du problème	20
2.6.1	Simplification du Modèle	21
2.6.2	Simulation en boucle ouverte	22
2.7	Conclusion	22

2.1 Introduction

LES centrales solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique sont actuellement les plus adoptées dans le monde, car ils offrent la possibilité de contrôler l'énergie électrique produite. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dans les états-Unis et l'Espagne tel que la centrale pilote de Californie construite en 1985 avec une capacité de 354 MW. La conversion d'énergie solaire en énergie électrique, dans une centrale solaire-thermique, se fait en trois étapes [8] :

- L'énergie solaire est convertie en énergie thermique à l'aide des concentrateurs solaires en se basant sur le principe de réflexion lumineuse.
- L'énergie ainsi produite sert comme une source d'énergie qui actionne un cycle thermique conventionnelle pour faire tourner des turbines, alors, la production de l'énergie mécanique.
- Par la suite, L'énergie mécanique est utilisée pour entraîner l'arbre d'une génératrice qui produit l'énergie électrique.

Dans ce travail on s'intéresse à un problème de commande souvent posé dans la première phase de conversion d'énergie. Alors, on cherche à asservir une température pour la faire suivre une référence désirée afin de contrôler l'énergie thermique produite. Mais avant d'entamer la problématique, on doit présenter et explorer les différentes technologies assurent cette conversion d'énergie.

2.2 Centrale solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique

Une centrale solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique est constituée principalement des trois éléments qui assurent les conversions d'énergie susvisées :

- Le champ solaire.
- Le cycle thermique.
- Le générateur électrique.

Un aperçu des différents éléments constituant la centrale solaire à concentrateur cylindro-parabolique est donnée dans la figure (2.1). Afin que la centrale solaire puisse fonctionner en nuit, en absence de la source primaire d'énergie, elle doit être munie d'un système de stockage pour conserver l'excès d'énergie journalière.

Le champ solaire est l'élément qui assure la conversion d'énergie solaire en énergie thermique, il est constitué d'une série des concentrateurs cylindro-parabolique. Il existe plusieurs configurations des champs des concentrateurs, telles que : l'installation à alimentation centralisée, l'installation à retour direct et l'installation à retour indirect [7]. La figure (2.2) montre ces différentes configurations.

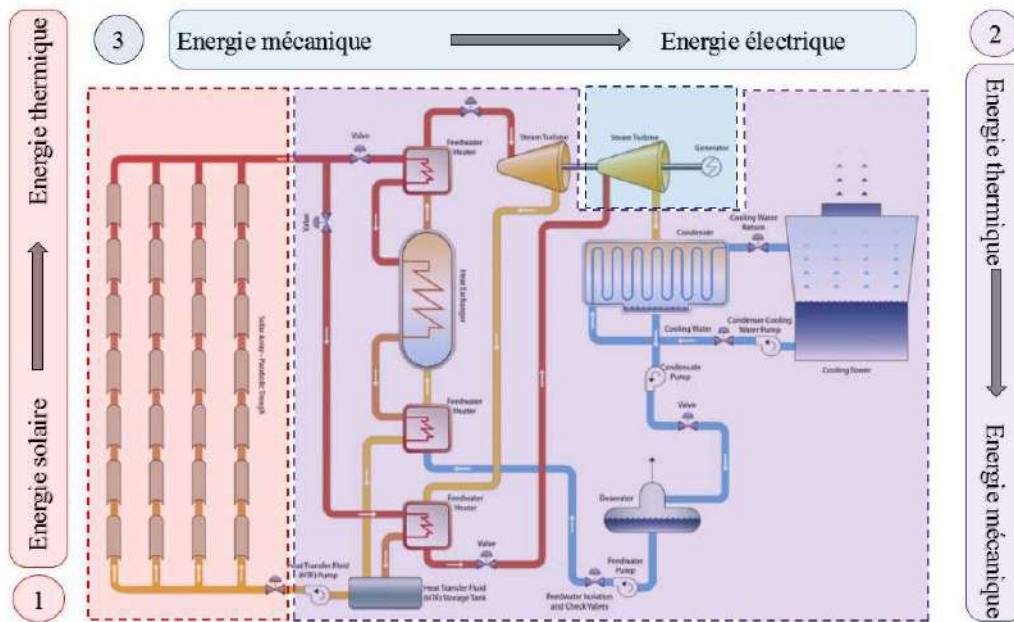


FIGURE 2.1: Constituants d'une centrale solaire thermique à concentrateur cylindro-parabolique[1]

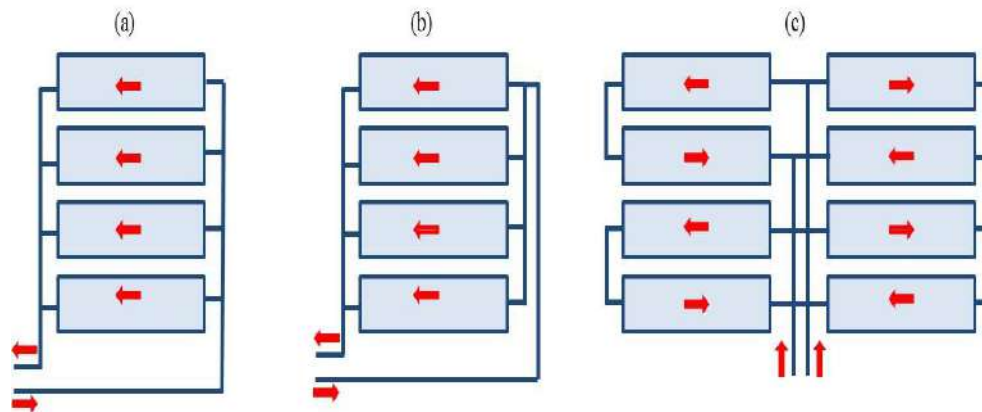


FIGURE 2.2: (a) :Installation à retour direct, (b) :Installation à retour indirect, (c) :Installation à alimentation centralisée[2]

L'installation à retour indirect est la plus utilisée car elle permet d'avoir un certain équilibre entre les pertes de charge. Le concentrateur solaire est l'élément de base dans le champs des concentrateurs.

2.3 Principe de fonctionnement du concetrateur cylindro-parabolique

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique est un processus industriel qui sert à convertir l'énergie-solaire en énergie-thermique en se basant sur le principe de réflexion des rayon-

nements solaire [9, 10], un aperçu de ce système est illustré dans la figure.(2.3).

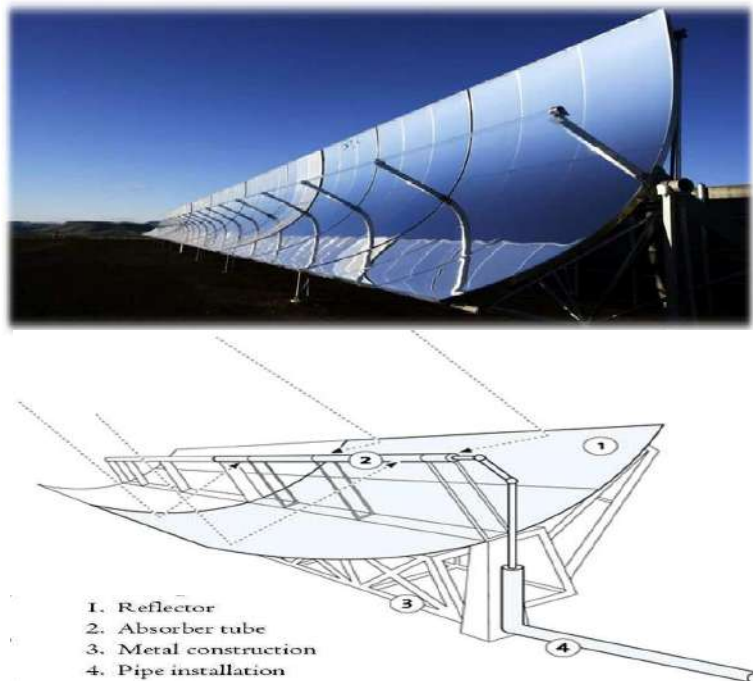


FIGURE 2.3: Concentrateur Solaire Cylindro-Parabolique

Les miroirs-réflecteurs sont choisis paraboliquement courbés afin de focaliser les rayons solaires incidents sur la ligne focale de la parabole, de ce fait, un fluide thermique (typiquement huile synthétique, eau ou sel fondu) coulant à l'intérieur de tube-récepteur sera chauffé. Le fluide chauffé est utilisé par la suite dans un échangeur de chaleur pour produire la vapeur d'eau. La vapeur ainsi produite fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité, ou sert comme une source d'énergie qui actionne un cycle thermique conventionnel.

2.4 Problème de commande

Afin de maximiser l'énergie solaire captée, ce processus est doté d'un système de poursuite solaire à un degré de liberté [11, 1], pour suivre la trajectoire solaire. La poursuite peut se faire de trois manières différentes :

- **Poursuite en boucle ouverte** : Elle est basée sur l'implémentation du modèle de mouvements du soleil selon la région, la période de l'année et l'heure sur un microcontrôleur [12].
- **Poursuite en boucle fermée** : Ce type de poursuite correspond à un contrôleur électro-optique qui a pour entrée l'énergie produite par le système. pour rendre le système complètement autonome, un mode recherche est activé quand l'erreur de poursuite est trop grande, l'erreur de poursuite est mise à jour chaque demi-heure en fonction des radiations disponibles (conditions météo) pour empêcher que ce mode ne soit actif en permanence.

- **Poursuite hybride** : Ce mode de poursuite utilise deux modes [13] : Le premier est une poursuite normale du soleil où le contrôleur maintient l'erreur de poursuite inférieure à une valeur prédéfinie. Le deuxième mode est une recherche du soleil selon une spirale rectangulaire qui s'élargie. Ce mode est très utile lors d'une longue période où le ciel reste couvert [13].

En conséquence de la poursuite solaire, le rendement sera maximisé. Cependant, un fonctionnement optimal ne correspond pas toujours à un rendement maximal, mais à un rendement qui peut être contrôlé selon le besoin énergétique. A cet égard, il y a eu de nombreuses études pour contrôler l'énergie thermique produite. Le principal objectif de ces travaux consiste à forcer la température de sortie du tube-récepteur à suivre une référence désirée [14, 15, 16]. Pour remédier à ce problème deux principales techniques ont été proposées : méthode empirique et méthode d'asservissement.

2.4.1 Méthode Empirique

Elle consiste à contrôler l'orientation du concentrateur vis-à-vis la direction principale du flux de radiation solaire incident, afin d'ajuster l'intensité de radiation concentrée au tube-récepteur de telle sorte qu'on atteigne la température de sortie désirée [17]. L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle s'appuie sur une démarche empirique. Cependant, la certitude dans une telle application est une obligation. En outre, ce système est souvent affecté par plusieurs sources de perturbation comme le changement brusque en radiation solaire causé par les passages nuageux, l'accumulation du sable et des impuretés sur les miroirs réflecteurs qui affectent la réflexion de rayons incidents. Alors, face de telles conditions cette méthode est impuissante d'atteindre les performances désirées.

2.4.2 Méthode d'asservissement

Le concept principal de cette technique consiste à prendre avantage de la relation qui existe entre la vitesse de fluide à l'intérieur du tube-récepteur et sa température. En effet, il est évident que lorsque la vitesse du fluide est basse sa température sera plus grande que celle obtenue à une vitesse relativement élevée, puisqu'il sera plus exposé à la source de chaleur (rayonnement solaire). Autrement dit, la relation entre ces deux grandeurs est inversement proportionnelle. En conséquence, la température de sortie peut être contrôlée en ajustant la vitesse du fluide à l'intérieur du tube-récepteur. Pour cela, une pompe à débit ajustable est insérée à l'entrée du tube-récepteur [18, 19, 20]. Et afin d'atteindre l'objectif ultime, il suffit de contrôler le débit volumétrique de la pompe. La solution offerte par cette méthode est basée sur l'asservissement. Nous tenons à rappeler que cette démarche consiste essentiellement en trois principales étapes :

- Après avoir défini l'objectif souhaité, on doit définir la variable de commande (l'entrée) et la variable à commander (la sortie).

- Par la suite, on doit définir une relation mathématique qui gouverne le transfert entre l'entrée et la sortie prédéfinie. Autrement dit, la modélisation du comportement dynamique du système.
- Finalement, en se basant sur la théorie de commande et le modèle de système on pourra aboutir à l'objectif désiré.

2.5 Modélisation du comportement dynamique du CSCP

Pour modéliser l'évolution de la température du fluide à l'intérieur du tube-récepteur, nous considérons un petit élément du tube, souvent appelé le volume de contrôle [1], compris entre z et $z+\Delta z$ comme illustré dans la figure (2.4). L'enthalpie accumulée dans le volume de

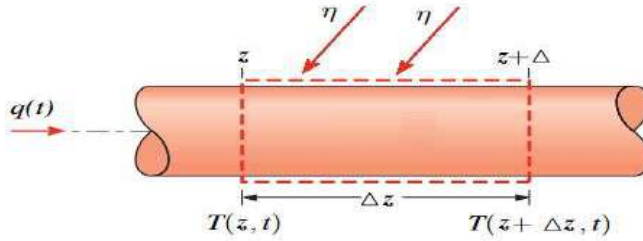


FIGURE 2.4: Volume de Contrôle[1]

contrôle considéré entre deux instants successifs t et $t+\Delta t$, est donné par la relation suivante [17] :

$$E = \rho_f c_f s_f \Delta z (T(z, t + \Delta t) - T(z, t)) \quad (2.1)$$

où :

s_f : est la superficie de la section du tube.

ρ_f, c_f : sont la densité et la chaleur spécifique du fluide (respectivement).

$T(z, t)$: est la température de fluide, qui est en fonction du temps et de la position longitudinale z .

D'autre part, le calcul du bilan énergétique permet de calculer l'enthalpie accumulée susmentionné comme suit [17] :

$$E = E_1 + E_2 \quad (2.2)$$

Telle que :

- E_1 : est la différence entre l'enthalpie à l'entrée du tube et celle de sortie (on considère que le fluide est en écoulement), qui est donnée par :

$$E_1 = \rho_f c_f q(t) \Delta t (T(z, t) - T(z + \Delta z, t)) \quad (2.3)$$

où :

$q(t)$: est le débit de fluide.

- E_2 : est l'augmentation d'enthalpie dû à l'énergie solaire à l'intérieur du tube, qui est donnée par :

$$E_2 = \alpha \eta \Delta z \Delta t \quad (2.4)$$

où :

η : est l'intensité de la radiation solaire.

α : est un paramètre lié à l'efficacité de l'absorption d'énergie par le fluide.

Substituons (2.1), (2.3) et (2.4) dans (2.2), mène à :

$$\rho_f c_f s_f \Delta z (T(z, t + \Delta t) - T(z, t)) = \rho_f c_f q(t) \Delta t (T(z, t) - T(z + \Delta z, t)) + \alpha \eta \Delta z \Delta t \quad (2.5)$$

La division de (2.5) par $\Delta t \Delta z$, mène à l'équation suivante :

$$\rho_f c_f s_f \frac{T(z, t + \Delta t) - T(z, t)}{\Delta t} = \rho_f c_f q(t) \frac{T(z, t) - T(z + \Delta z, t)}{\Delta z} + \alpha \eta \quad (2.6)$$

Lorsque Δt et Δz tend vers zéro nous obtenons le modèle suivant :

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} + \frac{q(t)}{s_f} \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \quad (2.7)$$

Le modèle (2.7) décrit l'évolution de la température à l'intérieur du tube-récepteur le long de la dimension spatiale (le long du tube). En outre, il exprime la relation entre la température du fluide et sa vitesse, donnée par le rapport entre le débit et la superficie de la section du tube, i.e.

$$\frac{\partial \overbrace{[T(z, t)]}^{\text{Température}}}{\partial t} + \underbrace{\left[\frac{q(t)}{s_f} \right]}_{\text{Vitesse} = u(t)} \frac{\partial \overbrace{[T(z, t)]}^{\text{Température}}}{\partial z} = \underbrace{\left[\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \right]}_{\triangleq s(t)} \quad (2.8)$$

2.6 Préliminaires et formulation du problème

Pour remédier au problème de commande susvisé, de nombreuses méthodes ont été proposées. Ces méthodes peuvent être classées, selon leurs principes, en deux catégories : "**méthode indirecte**" et "**méthode directe**" [21, 22]. La première consiste à faire des simplifications au modèle avant la synthèse du contrôleur afin de réduire sa complexité. La théorie la plus adoptées pour cela est basée sur la discrétisation spatiale dans laquelle de nombreuses méthodes sont appliquées, telles que : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis [23]. Alors que les méthodes de la deuxième catégorie utilisent directement le modèle EDP pour la synthèse du contrôleur en se basant sur un modèle d'état à dimension infinie obtenu par la description du modèle EDP dans l'espace de Hilbert ou l'espace de Banache [21]. Par la suite, le contrôleur résultant est réduit pour faciliter

sa mise en oeuvre et son implémentation sur des cartes de commande.

2.6.1 Simplification du Modèle

Considérons la classe des systèmes non linéaires régie par le modèle EDP définie comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = s(t), & z \in \Omega, t \in \mathbb{R}^+ \end{cases} \quad (2.9a)$$

$$\begin{cases} T(z, 0) = T_0(z), & z \in \Omega \end{cases} \quad (2.9b)$$

$$\begin{cases} y(t) = T(L, t), & t \in \mathbb{R}^+ \end{cases} \quad (2.9c)$$

L'objectif de commande consiste à synthétiser une loi de commande $u(t)$ assurant la bornitude de tous les signaux du système bouclé et la poursuite pour la sortie $y(t)$ d'une trajectoire $y_r(t)$.

Dans notre application, les paramètres du système (2.9) correspondents aux regroupements paramétriques suivant :

$$\begin{cases} s(t) \triangleq \frac{v_0 \eta}{\rho_f c_f} \\ u(t) \triangleq \frac{q(t)}{s_f} \end{cases}$$

Afin de s'affranchir de la complexité liée à l'opérateur de différentiation par rapport à la seconde variable, une approche conventionnelle est souvent adoptée pour approximer le modèle EDP par un modèle équivalent constitué d'un ensemble d'équations aux dérivées ordinaires. Chaque équation ODE représente le comportement du système dans une région spatiale bien définie.

L'idée de cette approche consiste à subdiviser l'horizon spatial à un maillage équidistant de longueur Δz . Par la suite, on approxime l'opérateur susvisé dans chaque maille par la méthode des différences finies comme suit : $\forall z \in [z_i - \Delta z, z_i]$,

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \approx \frac{T(z_i, t) - T(z_i - \Delta z, t)}{\Delta z} \quad (2.10)$$

En substituant cette approximation dans le modèle EDP (2.9), on obtient le modèle ODE suivant : $\forall z \in [z_i - \Delta z, z_i]$,

$$\frac{dT(z, t)}{dt} = -u(t) \frac{T(z_i, t) - T(z_i - \Delta z, t)}{\Delta z} + s(t) \quad (2.11)$$

Pour écrire le modèle (2.11) sous une représentation d'état, nous considérons la variable d'état suivante :

$$x_i(t) = T(i \Delta z, t)$$

Avec le choix du vecteur d'état ci-dessous, nous représentons le comportement dynamique du système le long de l'horizon spatial :

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & \cdots & x_n(t) \end{bmatrix}$$

En conséquence, le modèle d'état équivalent est défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B s(t) + D T_{in}(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

où :

$$A = \begin{bmatrix} -u(t) & 0 & \dots & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & u(t)I_{n-1} & \ddots & 0 \\ & & & -u(t) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C^T = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

tel que :

I_{n-1} est la matrice identité d'ordre $n-1$.

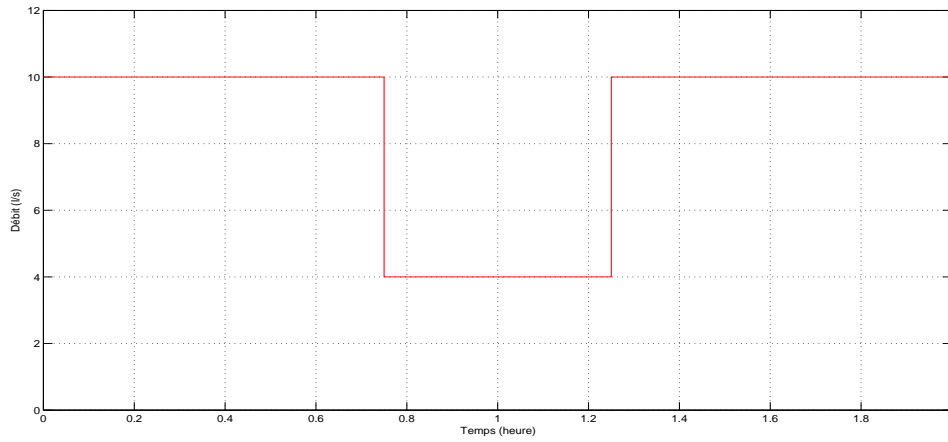
2.6.2 Simulation en boucle ouverte

Afin de tester le modèle dynamique du concentrateur cylindro-parabolique. On propose une analyse temporelle basée sur la réponse indicielle de ce système. Pour cela, on applique un débit volumétrique constant et on cherche à prouver, par simulation, que la relation entre le débit et la température de sortie est inversement proportionnelle. La radiation solaire et la température d'entrée du tube récepteur sont choisis constants. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (2.5).

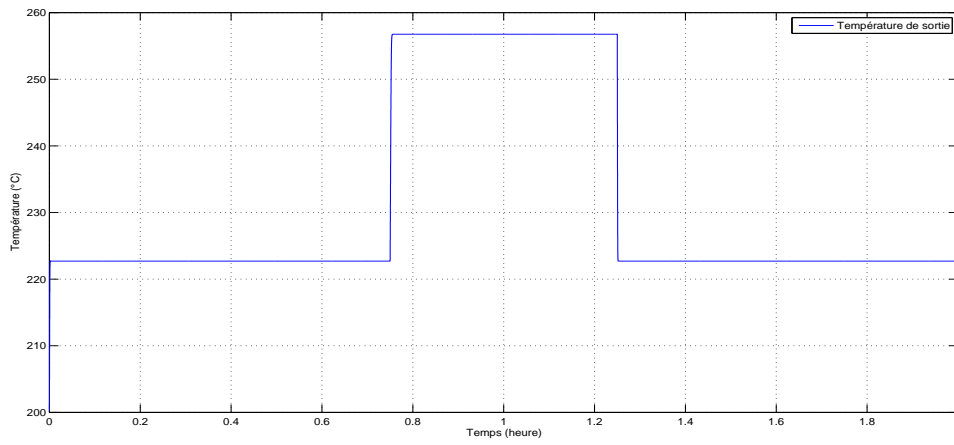
Comme on peut voir, lorsque le débit varie d'une façon croissante la température de sortie subit une variation décroissante et vice-versa. Donc, on constate que la relation entre le débit et la température de sortie est inversement proportionnelle et le modèle du système est valide.

2.7 Conclusion

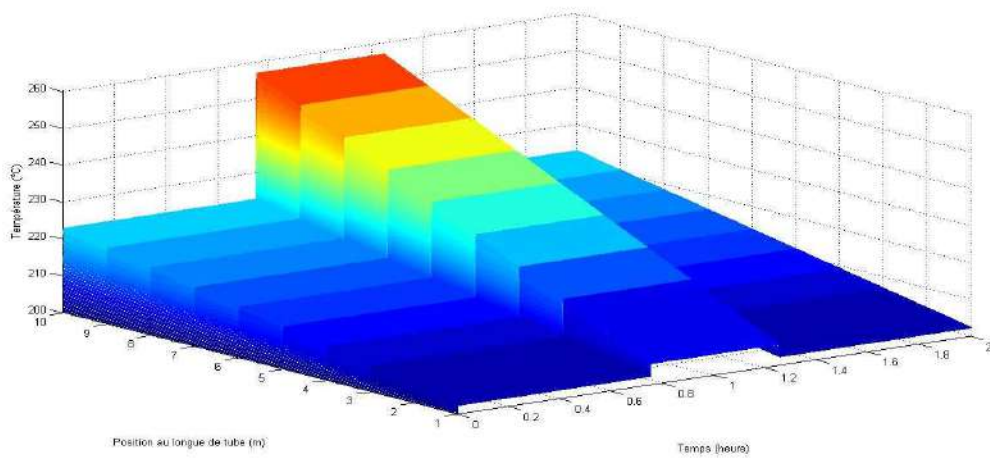
Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de commande du concentrateur solaire cylindro-parabolique. Dans un premier lieu, nous avons présenté le contexte global de notre application. Par la suite, une modélisation mathématique du comportement dynamique de ce système est synthétisée en utilisant les lois de conservation d'énergie. Finalement, une simulation en boucle ouverte du modèle ainsi obtenu est effectuée sous Matlab. A travers ce chapitre on a pu constater la grande importance du problème traité dans ce mémoire.



(a) Débit de fluide



(b) Température de sortie



(c) Température le long de tube

FIGURE 2.5: Simulation en boucle ouverte

CHAPITRE 3

COMMANDE PAR MODE GLISSANT DU CONCENTRATEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE

"Tout changement est une menace pour la stabilité"
Aldous Huxley

Sommaire

3.1	Commande à structure variables	25
3.1.1	Commande par mode glissant	25
3.2	Conception de la commande par mode de glissement	25
3.2.1	Choix de la surface de glissement	25
3.2.2	Conditions d'existence du régime glissant	26
3.2.3	Établissement de la loi de commande	26
3.3	Synthèse de la commande par mode de glissement pour le CSCP	27
3.4	Phénomène de Chattering	28
3.5	Résultats de simulation	29
3.5.1	Test 1 : (problème de chattering)	29
3.5.2	Test 2 : (Poursuite de référence)	30
3.5.3	Test 3 : (Robustesse)	35
3.6	Conclusion	35

3.1 Commande à structure variables

Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classiques peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes. 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 à suivre celle définie par l'équation de cette surface. Quand l'état est maintenu sur cette surface, le système est dit en régime glissant. La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées [24].

3.1.1 Commande par mode glissant

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande [25], la structure du système dynamique de manière que le vecteur d'état suive une trajectoire $s(x) = 0$ dans l'espace d'état. Les objectifs principaux de cette technique de commande sont [26, 27] :

- Synthétiser une surface de glissement de telle manière à ce que toutes les trajectoires d'état du système obéissent à un comportement désiré en terme de poursuite, de régulation et de stabilité ;
- Déterminer une loi de commande ou de commutation, qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface ;
- Réduire le phénomène de chattering (broutement), dû à la discrétisation des fonctions de commutation.

3.2 Conception de la commande par mode de glissement

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en oeuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes [28] :

3.2.1 Choix de la surface de glissement

Le choix concerne le nombre nécessaire de surfaces de glissement ainsi que leurs formes, ces deux facteurs sont en fonction de l'application et l'objectif visé. Pour le choix de la forme de la surface de glissement, Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaires des surfaces de glissements dans le plan des phase donné par :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x\right)^{r-1} e(x) \quad (3.1)$$

x : la variable à commander ;

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

λ_x : une constante positive qui interprétera la dynamique de la surface ;

r : le degré relatif du système.

3.2.2 Conditions d'existence du régime glissant

C'est la condition sous laquelle la trajectoire d'état va atteindre la surface de glissement, appelée aussi "conditions d'attractivité". Deux types de conditions d'accès à la surface de glissement sont présentés : approche directe et approche de Lyapunov. On va utiliser l'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.

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 \text{ lorsque } S(x) > 0 \\ \dot{S}(x) < 0 \text{ lorsque } S(x) < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Cette condition est toutefois difficile à utiliser, particulièrement dans le cas d'un système multi-entrées.

3.2.3 Établissement de la loi de commande

Dans le but de forcer les états du système à atteindre la surface de glissement et le contraindre à rester sur cette surface malgré la présence des incertitudes et des perturbations, la commande u contient deux termes :

- La commande équivalente qui est un moyen de déterminer le comportement du système lorsqu'un régime glissant idéal est établi. Elle peut être calculée à partir de la condition d'invariance de la surface :

$$\begin{cases} S(x, t) = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Ce qui conduit à l'expression :

$$u_{eq}(x, t) = -\left[\frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)\right]^{-1}\left\{\frac{\partial S}{\partial x}f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t}\right\} \quad (3.4)$$

- La deuxième est une fonction discontinue qui permet de satisfaire la condition d'attractivité : $S(x)\dot{S}(x) \leq 0$. Elle est généralement de la forme :

$$u_{at} = -K \text{sign}(S) \quad (3.5)$$

3.3 Synthèse de la commande par mode de glissement pour le CSCP

Le degré relatif du système (3.1) est égal à un¹. Alors, la surface de Slotine est définie comme étant l'erreur de poursuite, i.e :

$$S = e \quad (3.6)$$

Avec :

$$e \triangleq y - y_r \quad (3.7)$$

Pour assurer la stabilité de l'erreur de poursuite définie par (3.7) au voisinage de zéro, on doit assurer la condition d'attractivité qui donnée comme suit :

$$S \dot{S} < 0 \quad (3.8)$$

Pour que la condition (3.8) soit vérifier, on peut choisir la dérivée de la surface de glissement comme suit :

$$\dot{S} = -K \text{sign}(S) \quad (3.9)$$

où :

K est un constant positif.

Il en résulte :

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K \text{sign}(e) \right) \quad (3.10)$$

Théorème 3.1 :

Considérons le système régi par le modèle (2.7). Si la loi de commande définie ci-dessous est appliquée à l'entrée de ce système,

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K \text{sign}(e) \right) \quad (3.11)$$

où :

$$e \triangleq y - y_r \quad (3.12)$$

Alors, l'erreur de poursuite $e(t)$ converge à zéro.

Preuve :

Considérons la fonction de Lyapunov candidate V définit comme suit :

$$V : \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^+$$

$$V(t) \triangleq \frac{1}{2} S^2(t)$$

1. Par définition, Le degré relatif d'un système c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour que la commande apparaisse

Pour garantir la stabilité au sens de Lyapunov, il faut assurer que \dot{V} est définie négative, i.e :

$$\dot{V} \leq 0 \quad (3.13)$$

On choisit \dot{V} comme suit :

$$\dot{V} = -K |S| \quad (3.14)$$

Par définition, nous avons :

$$S \dot{S} = -K |S| \quad (3.15)$$

De (3.15), nous avons :

$$\dot{S} = -K \text{sign}(S) \quad (3.16)$$

Il en résulte :

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K \text{sign}(e) \right) \quad (3.17)$$

On sait que :

$$u(t) = u_{at} + u_{eq} \quad (3.18)$$

Donc :

$$\begin{cases} u_{at} = -\frac{\Delta z}{x_{n-1} - x_n} K \text{sign}(S) \\ u_{eq} = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y} \right) \end{cases} \quad (3.19)$$

Ce qui termine la preuve. ■

3.4 Phénomène de Chattering

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Évidemment, pour une utilisation pratique, seule une commutation à une fréquence finie est possible, ce qui cause un retard entre la mesure de la sortie et le calcul de la commande, qui peut être amplifié si le système présente naturellement des retards ou des dynamiques négligées. Cela conduit le système à quitter la surface de glissement sans que la commande ne puisse réagir [29, 30, 31].

Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités de la commande peuvent entraîner des oscillations en haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement, ce phénomène est appelé broutement ou chattering. En conséquence, les performances et la robustesse du système sont dégradées et cela peut même conduire à l'instabilité [29, 31].

Pour remédier à ce problème, de nombreuses solutions ont été proposées dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène. Il existe des méthodes comme celle de la couche limite (boundary layer) qui consiste à remplacer la fonction *sign* de la loi de commande par

une approximation continue à gain élevé dans un voisinage de S , et saturée en dehors de ce voisinage. Le régime glissant qui en résulte n'est plus confiné dans S , mais dans un voisinage de celui-ci. Dans ce cas, le système est dit en régime pseudo-glissant. Ces méthodes réduisent la robustesse de la commande. Elles sont paramétrées par une constante positive δ réglée pour avoir un bon compromis entre la réduction du chattering et la conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus δ est petit, plus l'approximation tend vers la fonction *sign*, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering [29, 31].

Les fonctions les plus utilisées sont [29, 31] :

Fonction saturation

$$sat(\sigma, \delta) = \begin{cases} sign(\sigma) & si \ |\sigma| \geq \delta \\ \frac{\sigma}{\delta} & si \ |\sigma| \leq \delta \end{cases} \quad (3.20)$$

La fonction pseudo-signe

$$v(\sigma, \delta) = \frac{\sigma}{|\sigma| + \delta} \quad (3.21)$$

La fonction arctangente

$$v(\sigma, \delta) = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\sigma}{\delta}\right) \quad (3.22)$$

La fonction tangente hyperbolique

$$v(\sigma, \delta) = \tanh\left(\frac{\sigma}{\delta}\right) \quad (3.23)$$

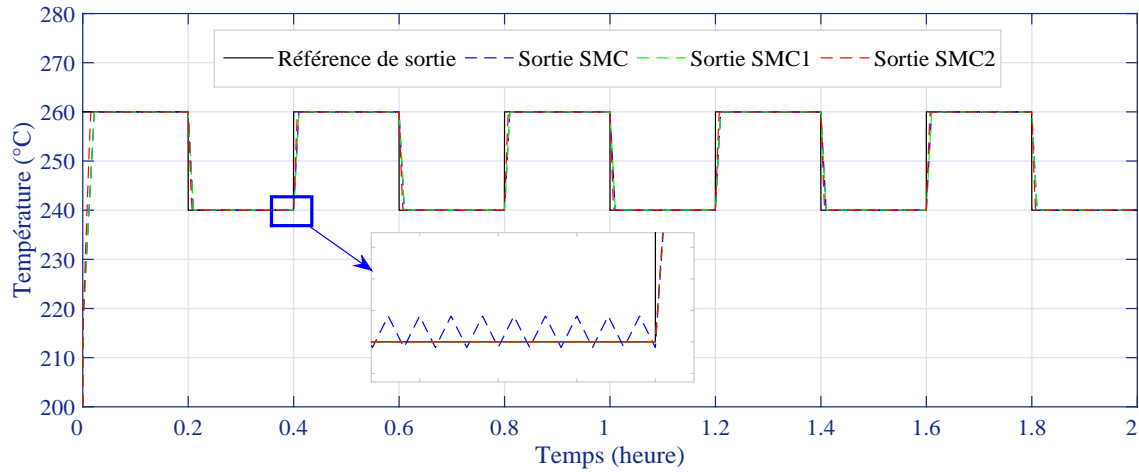
3.5 Résultats de simulation

3.5.1 Test 1 : (problème de chattering)

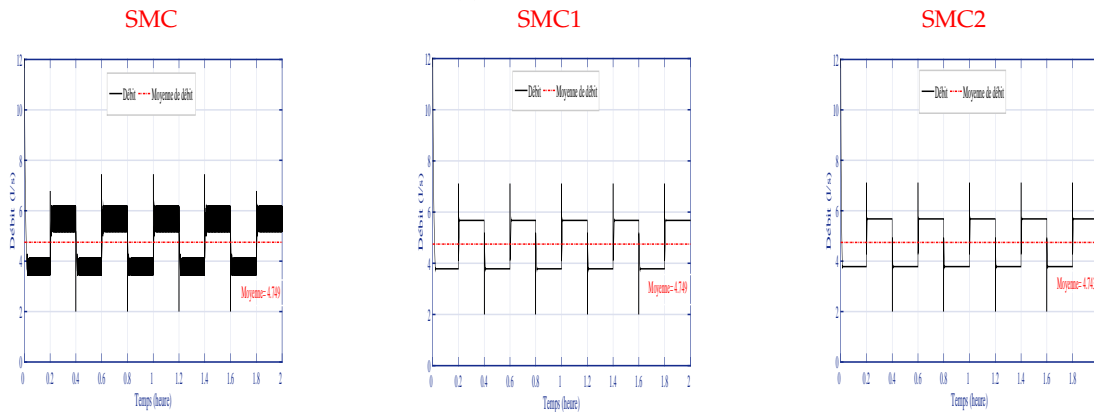
Afin d'éviter le problème de chattering de la commande par mode de glissement causé par la fonction signe, on propose dans ce test de remplacer cette fonction par la fonction tangente hyperbolique (\tanh), puis, par la fonction arctangent (\arctan). Les commandes résultantes sont données comme suit :

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K sign(e) \right) & \text{SMC} \\ u(t) &= \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K \tanh(e) \right) & \text{SMC1} \\ u(t) &= \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r(t) + K \arctan(e) \right) & \text{SMC2} \end{aligned}$$

Pour voir l'apport de ces modifications sur le problème de chattering, nous testons les performances de poursuite des trois schémas de commande et nous analysons par la suite les signaux de commande. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (3.1a)-(3.1b). A partir de ces résultats, on peut remarquer que le problème de chattering n'existe plus en



(a) Poursuite de référence



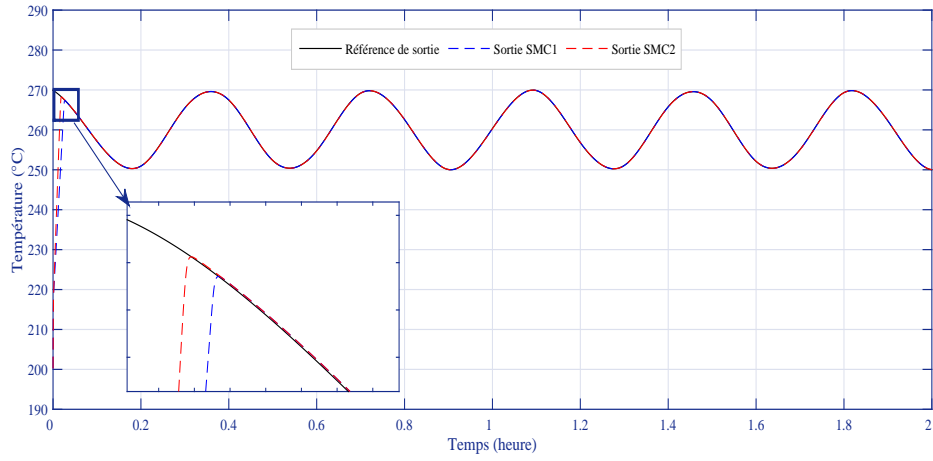
(b) signal de commande

FIGURE 3.1: Réduction du problème de chattering

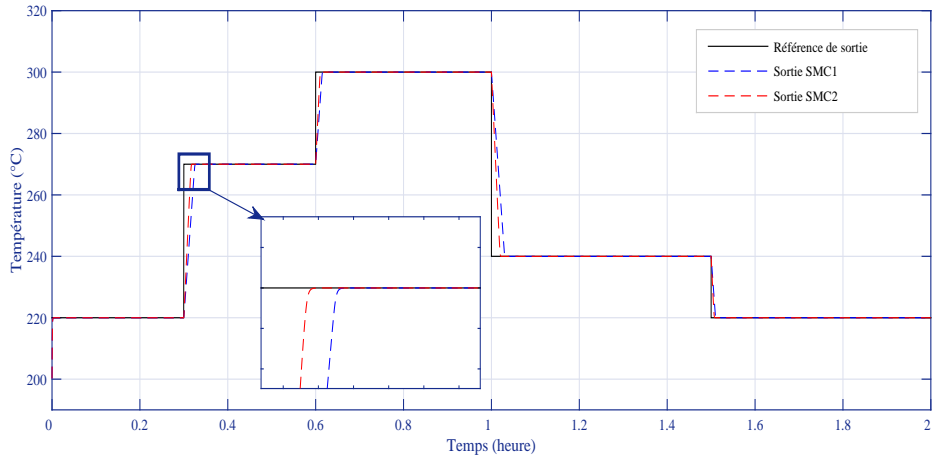
utilisant des fonctions continues, ce qui présente un avantage par rapport au cas du mode glissant idéal.

3.5.2 Test 2 : (Poursuite de référence)

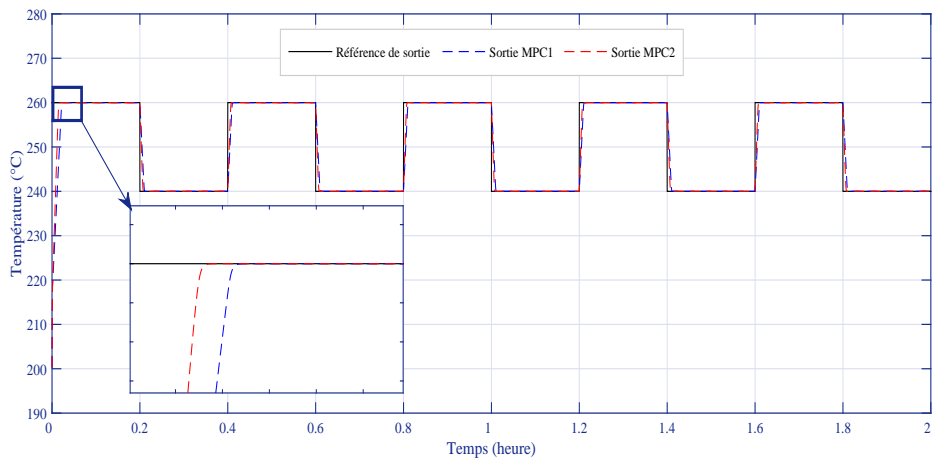
Afin de valider et tester les commandes synthétisées dans ce chapitre, nous étudions dans ce test les performances de poursuite pour trois références : référence en créneaux, référence sinusoïdale et référence carré. Cette variété des références va nous permettre de tester nos commandes dans des conditions de fonctionnement extrêmes. On présente dans les figures (3.2)-(3.4) la poursuite des références, les signaux de commande et la variation de la température



(a) Référence Sinusoidale



(b) Référence en Créneaux



(c) Référence Carré

FIGURE 3.2: Performance de poursuite des commandes par mode de glissement

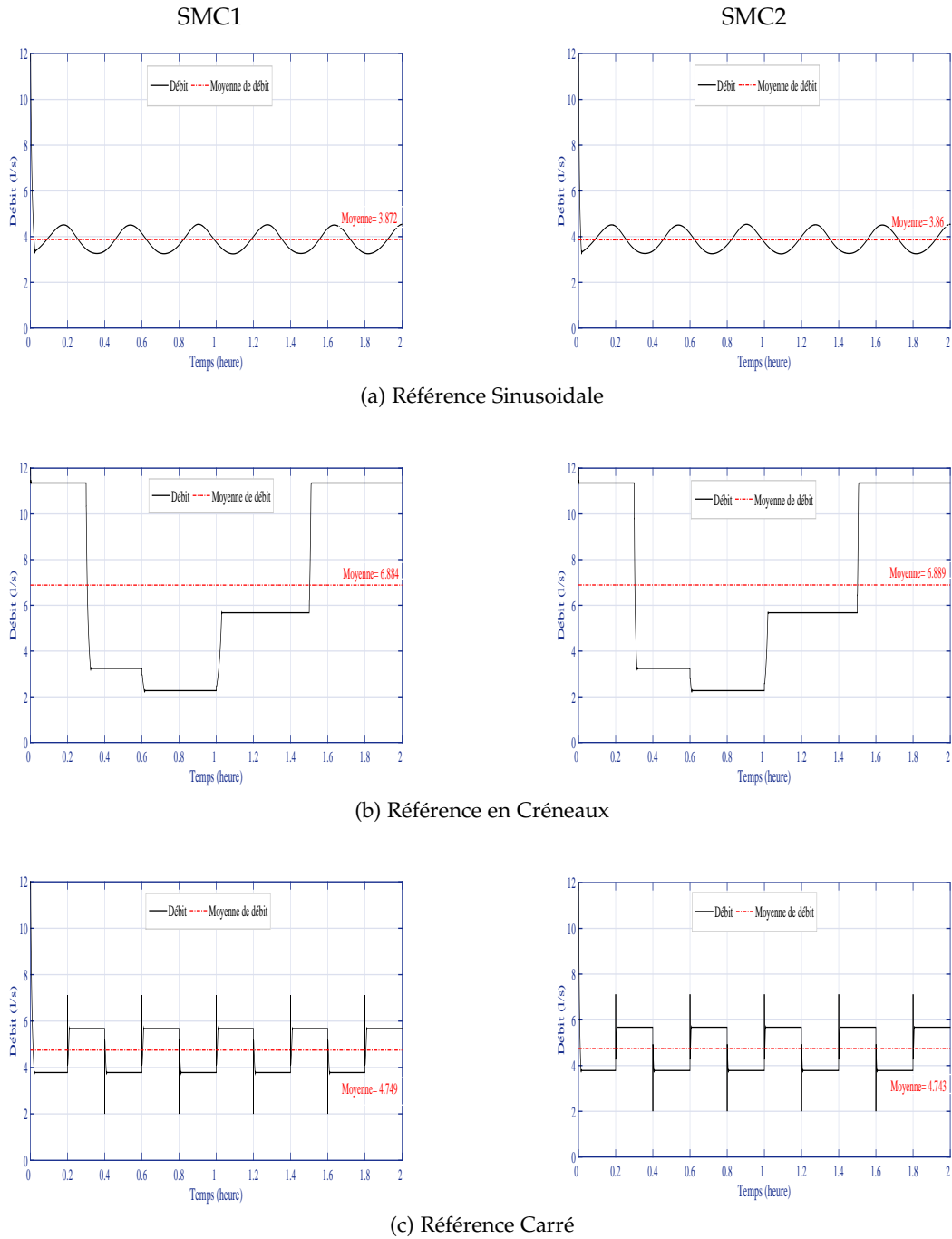
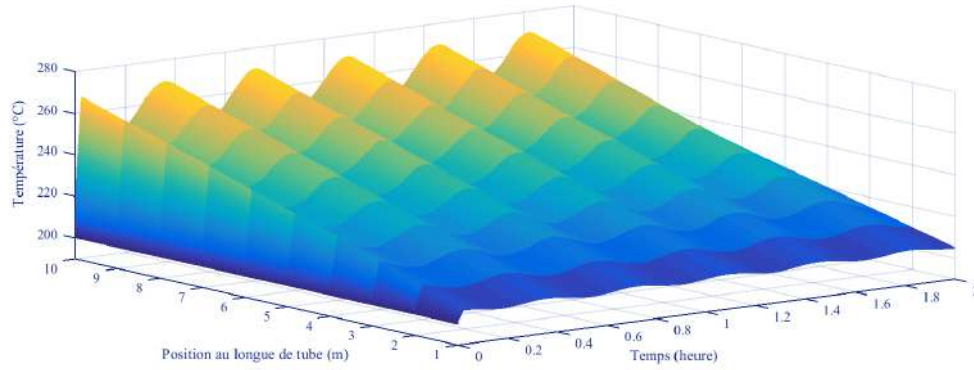
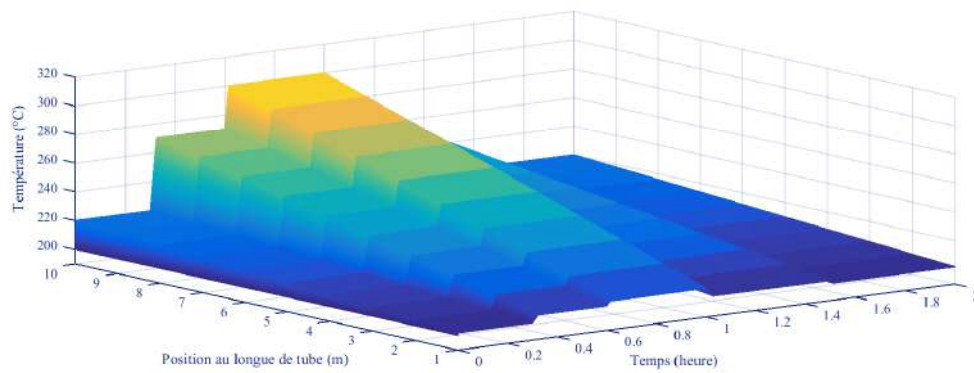


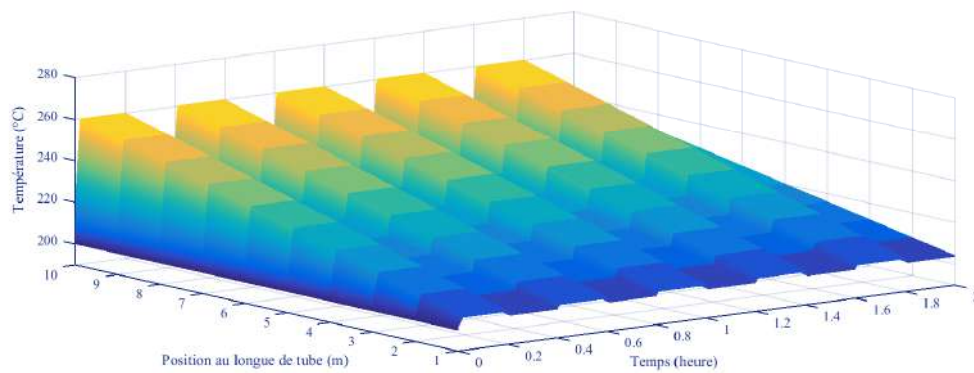
FIGURE 3.3: Signaux de commande



(a) Référence Sinusoidale



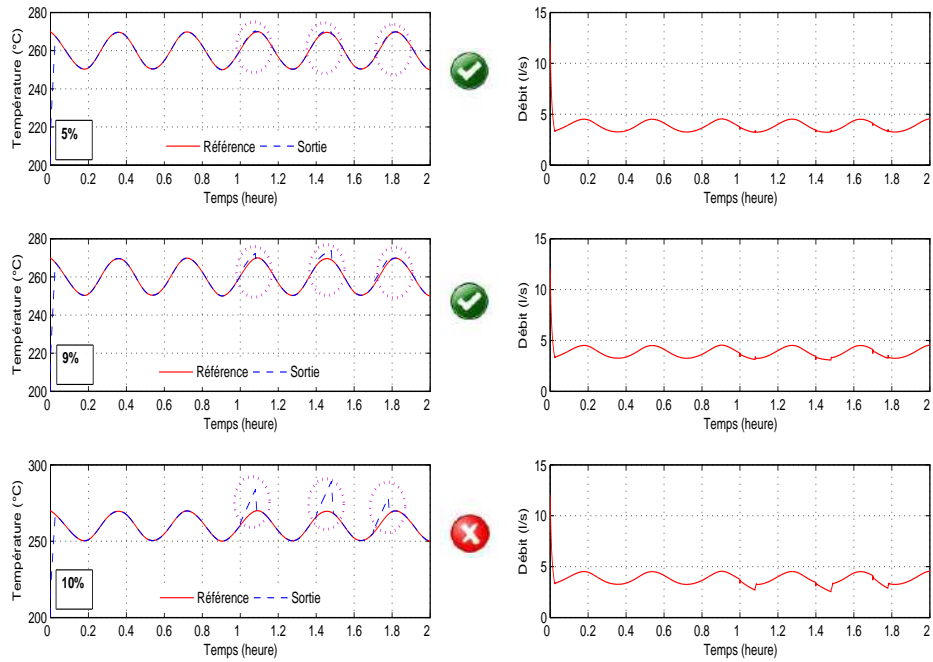
(b) Référence en Créneaux



(c) Référence Carré

FIGURE 3.4: Évolution de la température le long du tube récepteur

SMC1



SMC2

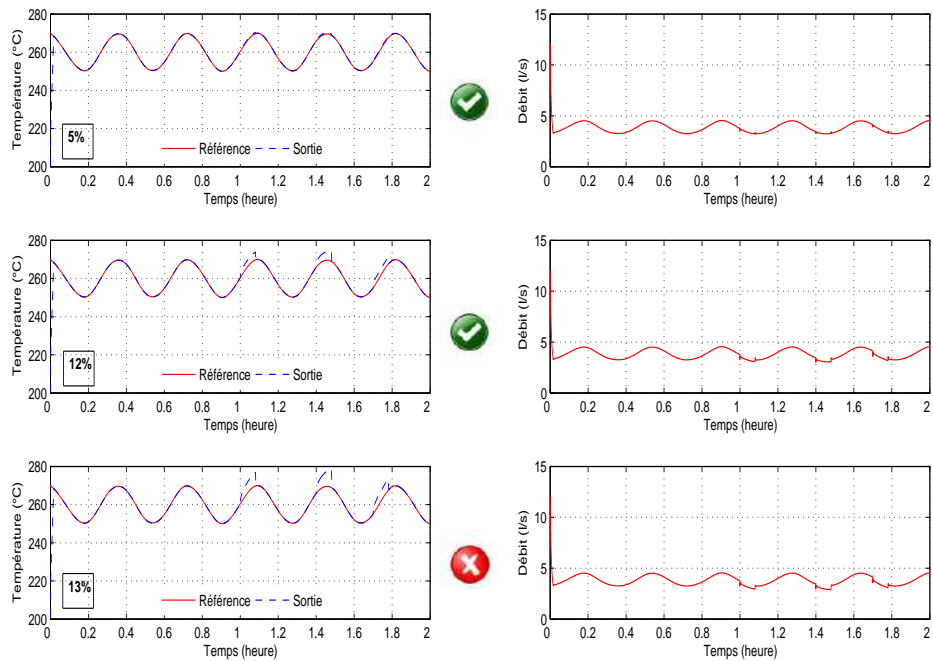


FIGURE 3.5: Test de robustesse

le long du tube récepteur pour les trois référence.

On peut remarquer que la température suit parfaitement sa référence pour les deux contrôleurs (SMC1 et SMC2).

3.5.3 Test 3 : (Robustesse)

Dans ce dernier test, nous allons vérifier la robustesse de nos schémas de commande vis-à-vis les perturbations intérieurs et/ou extérieurs. La perturbation considérée dans ce test est le problème causé par la variation en radiation solaire. Cette perturbation affecte le fonctionnement du concentrateur surtout dans les journées de mauvais-temps à cause des passages nuageux. L'effet indésirable du passage nuageux peut affecter directement le fonctionnement du concentrateur par un ombrage partiel, comme il peut affecter seulement le capteur de radiation solaire, le Pyranomètre², lorsqu'un nuage est situé au-dessus de ce dernier. Alors, on va étudier la robustesse vis-à-vis les changements paramétriques causés par un ombrage partiel au un défaut de capteur (cas d'un pyranomètre ombré seulement). Pour cela, nous considérons une erreur additive dans la valeur de radiation solaire est on l'applique au concentrateur ou bien au contrôleur (l'un des deux). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (3.5).

Si on considère que l'erreur de poursuite admissible pour ce test est égale à $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Alors, on trouve que la commande SMC1 tolère une variation paramétrique en radiation solaire de $\pm 9\%$ et la commande SCM2 tolère une variation de $\pm 12\%$. Donc, la commande SMC2 est plus robuste que SMC1.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une commande basée sur l'analyse de stabilité par la méthode de Lyapunov pour atteindre l'objectif de commande. Les résultats obtenus montrent des très bonnes performances de poursuite de référence et une bonne robustesse vis-à-vis les changements paramétriques. L'inconvénient majeur de cette technique de commande est le problème de chattering. Ce problème est causé par la fonction discontinue signe qui apparaît dans l'expression de loi de commande. Pour soulever ce problème, on a adopté une solution largement utilisée dans la littérature. Le concept de cette solution consiste à remplacer la fonction discontinue signe par une fonction continue qui garde les mêmes performances de stabilité. Finalement, le problème de commande de la température du concentrateur solaire cylindro-parabolique est bien résolu grâce aux commandes proposées dans ce chapitre. Dans le chapitre suivant, on va essayer d'atteindre l'objectif de commande par une méthode basée sur d'autre principe de synthèse de loi de commande (l'optimisation).

2. Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré.

CHAPITRE 4

COMMANDE PRÉDICTIVE DU CONCENTRATEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE

"La chute n'est pas un échec. L'échec c'est de rester là où on est tombé!"

Socrate

Sommaire

4.1	Introduction	37
4.2	Philosophie et principe de la commande prédictive	37
4.3	Synthèse de la commande prédictive pour le concentrateur solaire	38
4.3.1	Prédiction du comportement futur du système	38
4.3.2	Optimisation quadratique	39
4.4	Résultats de simulation	42
4.4.1	Test 1 : (Influence de l'horizon de prédiction)	42
4.4.2	Test 2 : (Poursuite de Référence)	43
4.4.3	Test 3 : (Robustesse du Contrôleur)	43
4.5	Étude comparative	43
4.6	Conclusion	48

4.1 Introduction

LA commande prédictive ou commande à horizon glissant est une technique de commande basée sur la notion de prédiction du comportement de la dynamique des systèmes (linéaires ou non). Elle a fait ses débuts en 1962 suite aux travaux de Zadeh et Whalen, [32] dans [33]. Elle sera connue plus tard dans le monde industriel, particulièrement dans le secteur de la pétrochimie, suite aux travaux de Richalet et al. [34] à cause de la dynamique lente des systèmes pétrochimiques. Grâce à sa capacité à prendre en compte les contraintes, à contrôler les systèmes multivariables et la possibilité qu'elle offre d'utiliser différentes structures de modèle, la commande prédictive (non linéaire (NMPC)) est à présent largement reconnue comme l'une des techniques de contrôle les plus puissantes si ce n'est la seule approche possible dans beaucoup de problèmes de contrôle à résoudre, [35]. Au fil du temps, beaucoup d'améliorations ont été faites sur cette technique, notamment les travaux de Mayne et Michalska [36] et Michalska et Mayne [37]. Aujourd'hui, elle est également adaptée à la commande des systèmes rapides [38, 39].

Les avantages de cette technique de commande sont représentés par la possibilité de prendre en compte explicitement les contraintes dès la phase de conception et par la capacité de la méthode à gérer les contraintes pour des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output en anglais), ce qui est essentiel dans les applications industrielles. En contrepartie, l'inconvénient de la stratégie de commande prédictive est représenté par l'effort de calcul «en-ligne», ce qui limite l'applicabilité de cette technique aux systèmes lents ou avec un faible nombre d'états [40].

4.2 Philosophie et principe de la commande prédictive

La philosophie de la commande prédictive ou commande à horizon glissant, est basée sur la notion essentielle de prédiction, d'où son nom. Il faut prédire le comportement futur du système afin de pouvoir le contrôler par anticipation. C'est à partir de ce comportement futur, que le problème d'optimisation est posé à travers un critère quadratique, pour l'élaboration d'une loi de commande dans le but de poursuivre une consigne donnée par l'opérateur tout en minimisant le critère construit. Dans le cas d'un problème de poursuite de trajectoire, ce critère est construit sur l'erreur entre le signal de sortie considéré et le signal de référence (à poursuivre) [41].

Outre sa philosophie, le principe de la commande prédictive consiste à créer pour le système asservi un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre connue à l'avance, en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et en minimisant l'écart de ces prédictions à la trajectoire au sens d'une certaine fonction coût, tout en respectant des contraintes de fonctionnement. Cette idée est simple et intuitive, pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne. Par exemple, un piéton analyse l'état de son chemin sur un horizon assez lointain pour déterminer le chemin le plus rapide à prendre, en tenant compte des différentes

contraintes (feux de circulation , éviter la foule , passage glissant) [42].

4.3 Synthèse de la commande prédictive pour le concentrateur solaire

La synthèse de la commande prédictive est basée, essentiellement, sur deux étapes : la prédiction du comportement futur du système et l'optimisation quadratique.

4.3.1 Prédiction du comportement futur du système

Le développement en série de Taylor peut servir comme un outil de prédiction si on l'applique à la sortie du système $y(t)$ dans un voisinage σ comme suit :

$$\hat{y}(t + \sigma) = y(t) + \sigma \frac{dy(t)}{dt} + \sum_{i=2}^n \frac{\sigma^i}{i!} \frac{d^i y(t)}{dt^i} + R(\sigma^n) \quad (4.1)$$

Si on considère que t est l'instant présente, $t + \sigma$ est l'instant prédite et on néglige le reste du développement en série de Taylor. La prédiction de la sortie de système est donnée comme suit :

$$\hat{y}(t + \sigma) = y(t) + \sigma \frac{dy(t)}{dt} + \sum_{i=2}^n \frac{\sigma^i}{i!} \frac{d^i y(t)}{dt^i} \quad (4.2)$$

En réécrivant cette équation sous forme matricielle, on obtient :

$$\hat{y}(t + \sigma) = \begin{bmatrix} 1 & \sigma & \dots & \sigma^n/n! \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Par analogie, la prédiction de la référence désirée $y_r(t)$ peut s'écrire comme suit :

$$\hat{y}_r(t + \sigma) = \begin{bmatrix} 1 & \sigma & \dots & \sigma^n/n! \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \vdots \\ y_r^{(n)} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Nous rappelons que notre but est de trouver une loi de commande qui assure la poursuite de la référence $y_r(t)$. Pour cela nous définissons l'erreur de poursuite $e(t)$ comme suit :

$$e(t) \triangleq y(t) - y_r(t) \quad (4.5)$$

Soit $\hat{e}(t + \sigma)$ l'erreur prédite à l'instant $t + \sigma$, définit comme suit :

$$\hat{e}(t + \sigma) = \hat{y}(t + \sigma) - \hat{y}_r(t + \sigma) \quad (4.6)$$

En substituant (4.3) et (4.4) dans (4.6), on obtient :

$$\hat{z}(t + \tau) = \Phi(\tau) \Theta(t) \quad (4.7)$$

où :

$$\Phi^T(\tau) \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ \tau \\ \vdots \\ \tau^n/n! \end{bmatrix} ; \quad \Theta(t) \triangleq \begin{bmatrix} y - y_r \\ \dot{y} - \dot{y}_r \\ \vdots \\ y^{(n)} - y_r^{(n)} \end{bmatrix}$$

À cette étape la prédiction du comportement futur du système est achevée.

4.3.2 Optimisation quadratique

Un problème d'optimisation quadratique est un problème dans lequel on minimise (ou maximise) une fonction quadratique souvent appelée *la fonction coût*. Dans le synthèse de la commande prédictive on cherche à atteindre l'objectif de commande par la minimisation d'une fonction coût qui gouverne la dynamique du système.

4.3.2.1 Commande minimisante l'erreur prédite (MPC1)

Théorème 4.1 :

Considérons le système régi par le modèle (2.7). Si la loi de commande définie ci-dessous est appliquée à l'entrée de ce système,

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r + \frac{3}{2\mathbb{T}} e \right) \quad (4.8)$$

où :

\mathbb{T} est l'horizon de prédiction.

Alors, l'erreur de poursuite $e(t)$ converge à zéro.

Preuve :

Soit $J(t)$ le critère quadratique, pénalisant l'erreur prédite, définit comme suit :

$$J(t) \triangleq \frac{1}{2} \int_0^{\mathbb{T}} \hat{z}(t+\tau)^2 d\tau \quad (4.9)$$

- t est l'instant présent.
- $\tau \in [t, t+\mathbb{T}]$ est l'instant auquel la présentation est faite.

On cherche à trouver la commande $u(t)$ qui minimise le critère $J(t)$ le long de l'horizon \mathbb{T} .

En substituant (4.7) dans (4.9), on obtient :

$$\begin{aligned} J(t) &= \frac{1}{2} \int_0^{\mathbb{T}} \Theta^T(t) \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) \Theta(t) d\tau \\ &= \frac{1}{2} \Theta^T(t) \left(\int_0^{\mathbb{T}} \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) d\tau \right) \Theta(t) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Afin d'avoir le terme de la commande dans l'expression du critère quadratique $J(t)$ on a qu'à choisir l'ordre du développement en série de Taylor égal au degré relatif du système¹. Avec ce choix, on assure que l'ordre le plus élevé des dérivées de la sortie $y(t)$ dans le DST est égale au degré relatif du système. En conséquence, l'apparition de la commande dans l'expression du critère quadratique.

Avec ce choix nous obtenons l'identité suivante :

$$\int_0^{\mathbb{T}} \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) d\tau = \begin{bmatrix} \mathbb{T} & \frac{\mathbb{T}^2}{2} \\ \frac{\mathbb{T}^2}{2} & \frac{\mathbb{T}^3}{3} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

En substituant (4.11) dans (4.10), on obtient :

$$J(t) = \frac{1}{2} \Theta^T(t) \begin{bmatrix} \mathbb{T} & \frac{\mathbb{T}^2}{2} \\ \frac{\mathbb{T}^2}{2} & \frac{\mathbb{T}^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) \quad (4.12)$$

Finalement, la loi de la commande prédictive peut être obtenue par la minimisation du critère $J(t)$ comme suit :

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (4.13)$$

En conséquence,

$$\left(\frac{\partial \Theta(t)}{\partial u} \right)^T \begin{bmatrix} \mathbb{T} & \frac{\mathbb{T}^2}{2} \\ \frac{\mathbb{T}^2}{2} & \frac{\mathbb{T}^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) = 0 \quad (4.14)$$

Après quelque développement analytique nous obtenons la commande suivante :

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r + \frac{3}{2\mathbb{T}} e \right) \quad (4.15)$$

Ce qui termine la preuve. ■

4.3.2.2 Commande minimisante la commande et l'erreur prédite (MPC2)

Dans la deuxième partie de ce chapitre on considère un problème de minimisation de l'erreur prédite et la commande, à la fois, pour atteindre l'objectif de commande avec le minimum d'énergie.²

1. Par définition, Le degré relatif d'un système c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour que la commande apparaisse

2. Dans notre application le débit varie proportionnellement avec l'énergie électrique qui alimente la pompe (l'actionneur)

Théorème 4.2 :

Considérons le système régi par le modèle (2.7). Si la loi de commande définie ci-dessous est appliquée à l'entrée de ce système,

$$u(t) = \frac{\frac{2\mathbb{T}}{3} (\dot{y}_r - \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta) - e}{\frac{4}{\mathbb{T}^2 \mathbb{X}} + \frac{2}{3} \mathbb{T} \mathbb{X}} \quad (4.16)$$

où :

$$\mathbb{X} = \frac{x_{n-1} - x_n}{\Delta z} \quad (4.17)$$

Alors, l'erreur de poursuite $e(t)$ converge à zéro.

Preuve :

Soit $J(t)$ le critère quadratique, pénalisant l'erreur prédite et la commande, définit comme suit :

$$J(t) \triangleq \frac{1}{2} \int_0^{\mathbb{T}} \hat{e}(t+\tau)^2 d\tau + u^2(t) \quad (4.18)$$

- \mathbb{T} est l'horizon de prédiction.
- t est l'instant présent.
- $\tau \in [t, t+\mathbb{T}]$ est l'instant auquel la présentation est faite.

On cherche à trouver la commande $u(t)$ qui minimise le critère $J(t)$ le long de l'horizon \mathbb{T} .

Par analogie avec la commande prédictive précédente, on obtient :

$$J(t) = \frac{1}{2} \Theta^T(t) \begin{bmatrix} \mathbb{T} & \frac{\mathbb{T}^2}{2} \\ \frac{\mathbb{T}^2}{2} & \frac{\mathbb{T}^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) + u^2 \quad (4.19)$$

Finalement, la loi de la commande prédictive peut être obtenue par la minimisation du critère $J(t)$ comme suit :

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (4.20)$$

En conséquence,

$$\left(\frac{\partial \Theta(t)}{\partial u} \right)^T \begin{bmatrix} \mathbb{T} & \frac{\mathbb{T}^2}{2} \\ \frac{\mathbb{T}^2}{2} & \frac{\mathbb{T}^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) + 2u = 0 \quad (4.21)$$

Après quelque développement analytique nous obtenons la commande suivante :

$$u(t) = \frac{\frac{2\mathbb{T}}{3} (\dot{y}_r - \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta) - e}{\frac{4}{\mathbb{T}^2 x} + \frac{2}{3} \mathbb{T} x} \quad (4.22)$$

Ce qui termine la preuve. ■

4.4 Résultats de simulation

Afin d'évaluer les performances du contrôleur prédictifs, nous les testons sous divers conditions de fonctionnement dans cette section.

4.4.1 Test 1 : (Influence de l'horizon de prédiction)

Dans ce test nous allons nous intéresser par l'étude de l'influence de l'horizon de prédiction sur la dynamique de poursuite. Pour cela, nous choisissons différents valeurs de l'horizon T et on compare les résultats obtenues pour chacune des deux commandes (MPC1 et MPC2). Les paramètres de simulation du concentrateur cylindro-parabolique sont choisis pour assurer un fonctionnement nominal, comme illustré dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Température d'entrée $T_i(0)$	200 °c
Radiation solaire	900 w/m ²
Temps d'échantillonnage	36 s
Nombre de discrétisation	10

TABLE 4.1: Paramètres de simulation

Dans la figure (4.1), nous présentons les résultats de simulation :

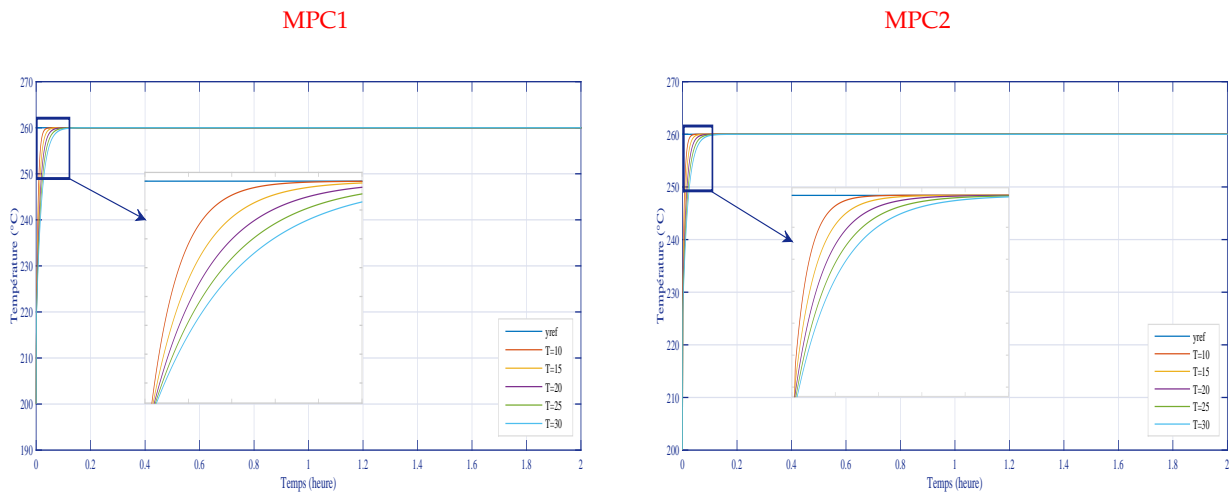


FIGURE 4.1: Influence de l'horizon de prédiction sur la dynamique de poursuite

A partir de ces résultats, on peut remarquer que lorsque on diminue l'horizon de prédiction on obtiens des réponses plus rapides, au prix d'une commande plus énergétique, un compromis doit être fait car le choix finale devra tenir compte des performances d'un coût et les contraintes sur la pompe (durée de vie, limites)

4.4.2 Test 2 : (Poursuite de Référence)

Afin de valider et tester les commandes prédictives synthétisées dans ce chapitre, nous étudions dans ce test les performances de poursuite pour trois références : référence en créneaux, référence sinusoïdale et référence carré. Cette variété des références va nous permettre de tester nos commandes dans des conditions de fonctionnement extrêmes. On présente dans les figures (4.2)-(4.4) la poursuite des références, les signaux de commande et la variation de la température le long du tube récepteur pour les trois référence.

On peut remarquer que la température suit parfaitement sa référence pour les deux contrôleurs (MPC1 et MPC2).

4.4.3 Test 3 : (Robustesse du Contrôleur)

Dans ce dernier test, nous allons vérifier la robustesse de nos schémas de commande vis-à-vis les perturbations intérieurs et/ou extérieurs. La perturbation considérée dans ce test est le problème causé par la variation en radiation solaire. Cette perturbation affect le fonctionnement du concentrateur surtout dans les journées de mauvais-temps à cause des passages nuageux. L'effet indésirable du passage nuageux peut affecter directement le fonctionnement du concentrateur par un ombrage partiel, comme il peut affecter seulement le capteur de radiation solaire, le Pyranomètre³, lorsqu'un nuage est situé au-dessus de ce dernier. Alors, on va étudier la robustesse vis-à-vis les changements paramétriques causées par un ombrage partiel ou un défaut de capteur (cas d'un pyranomètre ombré seulement). Pour cela, nous considérons une erreur additive dans la valeur de radiation solaire est on l'applique au concentrateur ou bien au contrôleur (l'un des deux). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (4.5).

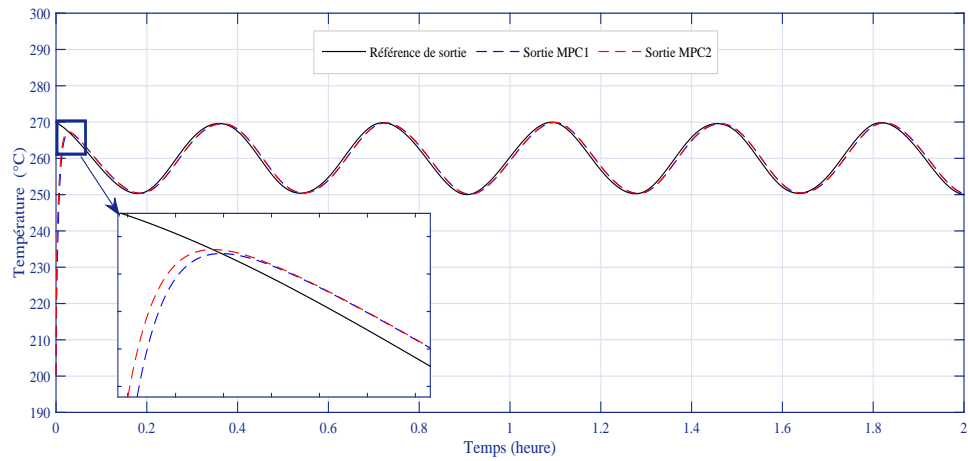
Si on considère que l'erreur de poursuite admissible pour ce test est égale à $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Alors, on trouve que la commande MPC1 tolère une variation paramétrique en radiation solaire de $\pm 4\%$ et la commande MPC2 tolère une variation de $\pm 3\%$. Danc, la commande MPC1 est plus robuste que MPC2.

4.5 Étude comparative

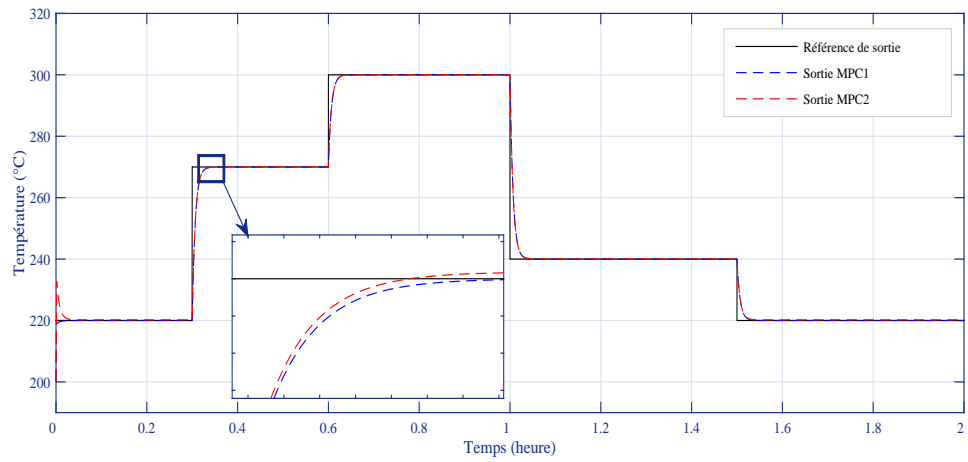
Pour une évaluation équitable, nous effectuons une étude comparative entre les approches de commande présentées dans ce travail. Cette comparaison est basée sur les critères de performance suivants :

- Temps de réponse
- Énergie
- Erreur statique
- Dépassement

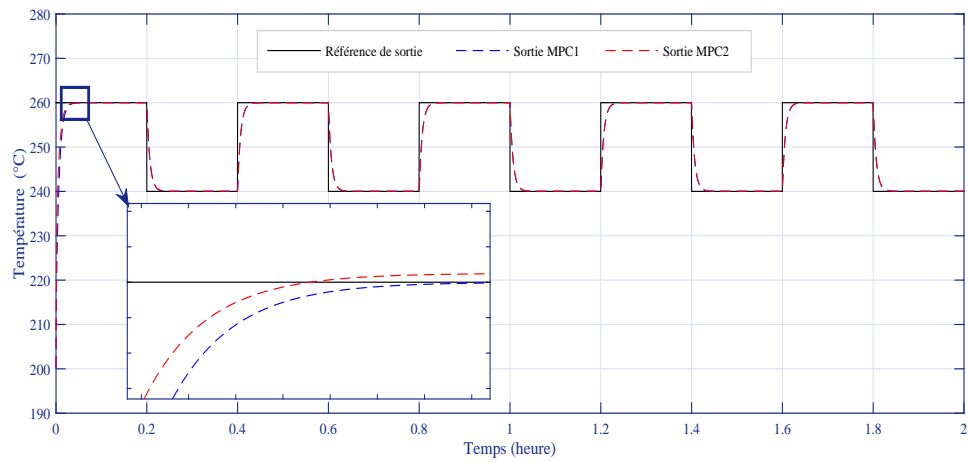
3. Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré.



(a) Référence Sinusoidale



(b) Référence en Créneaux



(c) Référence Carré

FIGURE 4.2: Performance de poursuite des commandes prédictives

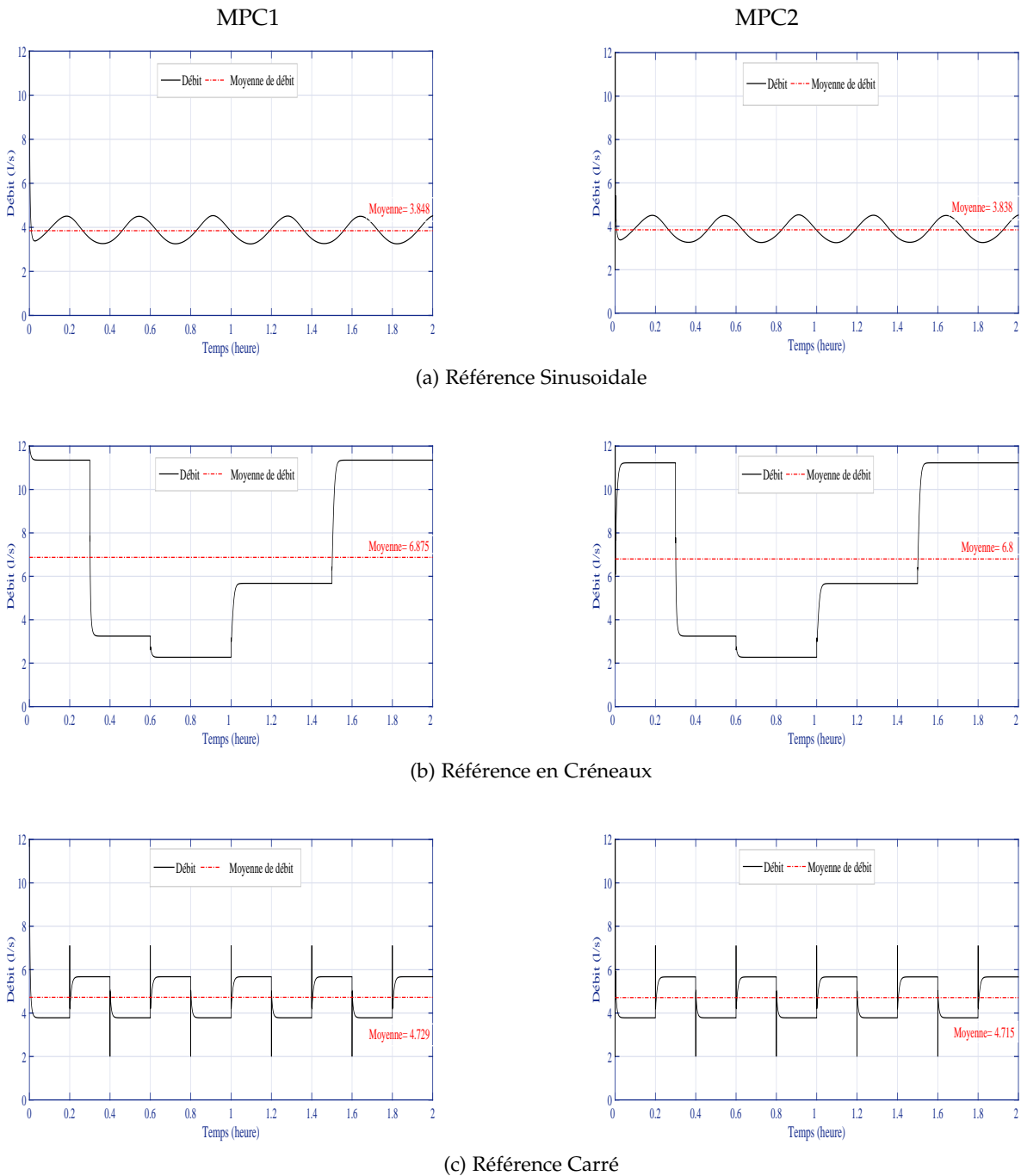
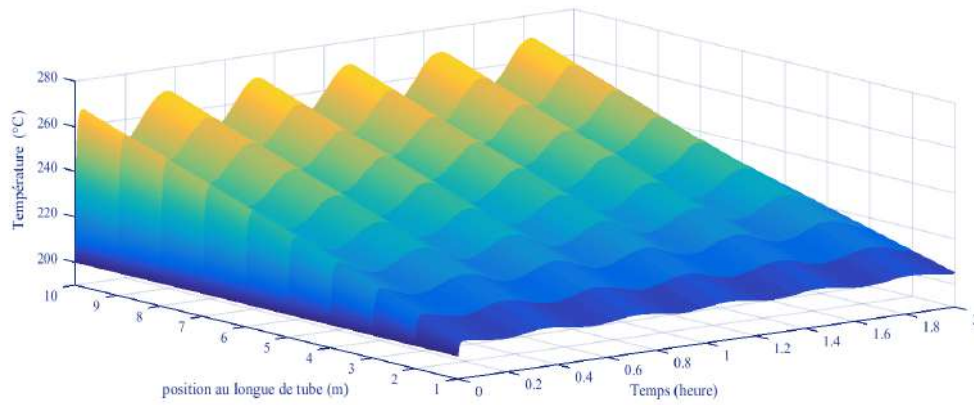
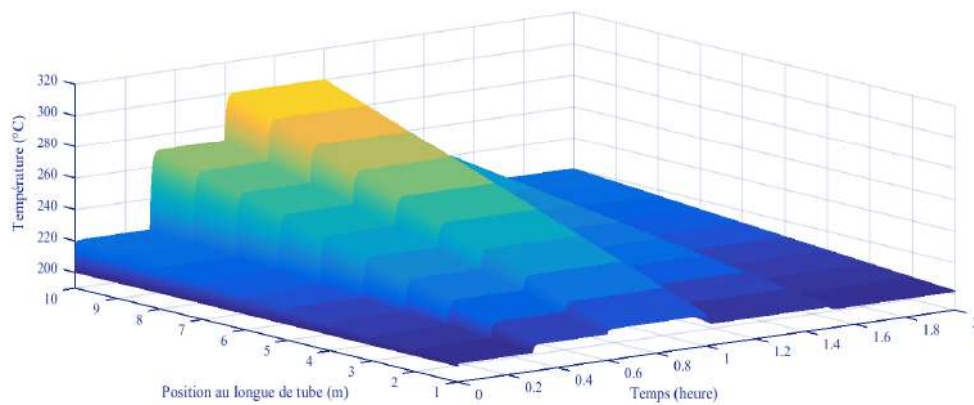


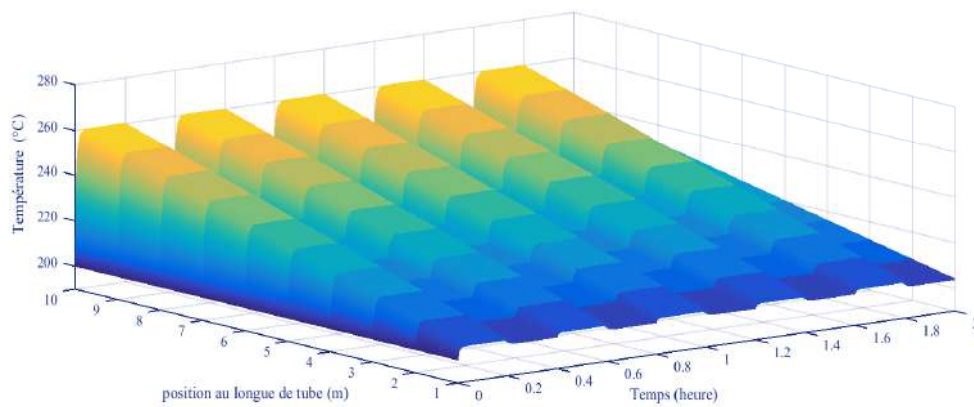
FIGURE 4.3: Signaux de commande



(a) Référence Sinusoidale



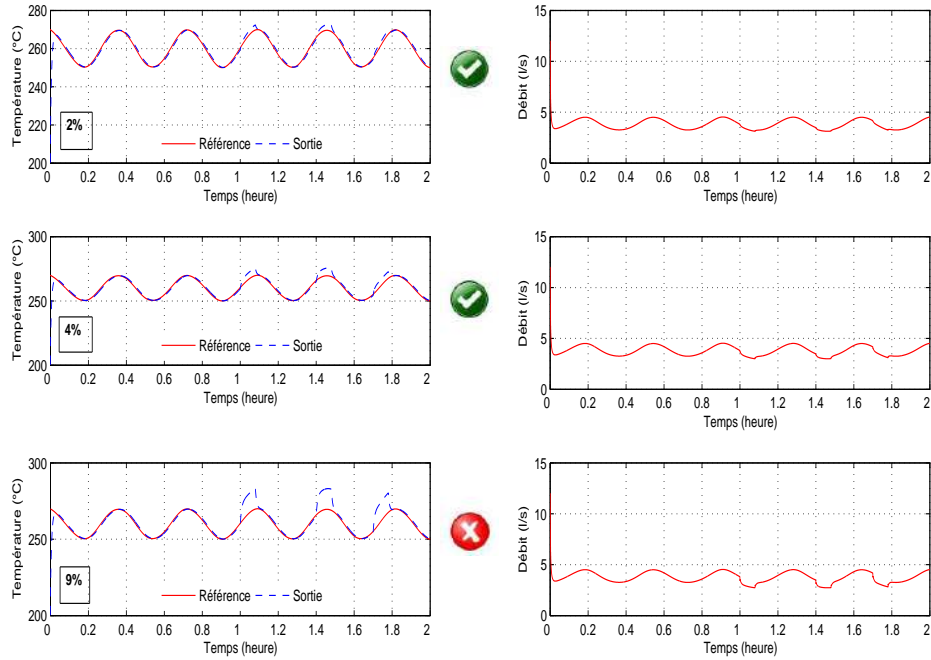
(b) Référence en Créneaux



(c) Référence Carré

FIGURE 4.4: Évolution de la température le long du tube récepteur

MPC1



MPC2

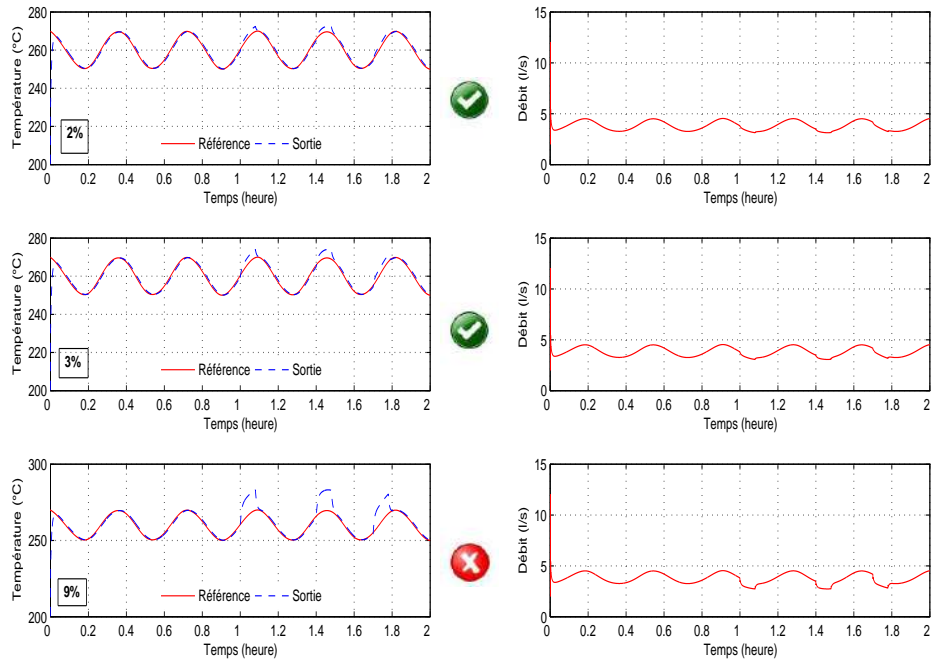


FIGURE 4.5: Test de robustesse

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

	Temps de réponse	Erreur statique	Énergie	Dépassement
Commande SMC 1	rapide	faible	grande (reg.trans) faible (reg. perm)	très faible
Commande SMC 2	rapide	faible	grande (reg.trans) faible (reg. perm)	très faible
Commande MPC 1	assez rapide	moyenne	moyenne (reg.trans) faible (reg. perm)	faible
Commande MPC 2	très rapide	moyenne	faible	faible

TABLE 4.2: Comparaison des différentes commandes selon leurs performances

4.6 Conclusion

Nous avons proposé au cours de ce chapitre deux commandes prédictives, synthétisées à base d'un principe d'optimisation, pour le contrôle de la température de sortie du concentrateur cylindro-parabolique. Les résultats obtenus avec ces lois de commande ont montré des bonnes performances dynamiques, une grande capacité de poursuite des références et une bonne robustesse vis-à-vis les variations des conditions météorologique.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

C E travail représente une contribution et une continuité aux divers travaux entrepris pour l'amélioration et le développement de l'utilisation des énergies renouvelables tout en préservant les ressources et assurant une rentabilité économique. Nous nous sommes penchés dans ce mémoire sur le problème de commande de la température de sortie du concentrateur cylindro-parabolique dans une centrale solaire thermique.

Dans l'introduction de ce travail nous avons bien exposé les défis énergétiques aux quelles notre monde est confronté aujourd'hui, chose qui met en évidence l'importance de développer, d'adapter et de généraliser de tels systèmes de production basé sur l'exploitation des diverses sources renouvelables. Cette introduction a été suivie d'un état de l'art, ou nous avons donné un aperçu général sur les centrales solaires thermiques en présentant leurs principes de fonctionnement, ses différentes technologies et les perspectives de développement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le problème qui a fait l'objet de ce mémoire. Après ce, vient la modélisation du comportement dynamique du concentrateur solaire. En se basant sur les lois de conservation d'énergie, le modèle du système est décrit par une équation aux dérivées partielles. Ce modèle est simplifié afin de faciliter la synthèse des lois de commande. Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué la commande par mode glissant directement sur le modèle non linéaire. La synthèse de cette loi de commande est basée sur un critère de stabilité. Pour cela, nous citons en premier lieu, son idée générale puis les différentes étapes de synthèse. Nous avons vu que cette commande utilise toute sa force pour réaliser les objectives de commande, comme elle a assuré la robustesse et donnée des très bonnes performances de poursuite.

Dans le quatrième chapitre, nous avons appliqué une commande synthétisée à base d'un critère d'optimisation pour l'accomplissement de l'objectif de commande. Cela nous permet d'évaluer et de comparer les deux approches de commande afin de choisir la meilleure. Pour cela, on a rappelé quelques notions théoriques de cette loi de commande et on a expliqué leur principe. Par la suite, nous avons appliqué la commande prédictive directement sur le modèle

non linéaire du concentrateur solaire. Cette commande a prouvé sa robustesse vis-à-vis les différentes sources des perturbations, mais ces performances de robustesse sont limitées par rapport à la commande par mode de glissement.

A l'issue de ce travail, les résultats fondamentaux proposés restent perfectibles et ouvrent la voie à de nouveaux axes de recherche. Parmi les directions jugées prometteuses, nous citons.

- Nous espérons la mise en oeuvre expérimentale des lois de commandes développées sur un système réel.
- Le choix des paramètres de réglage n'est pas optimisé. Il est envisageable d'optimiser ce choix dans le but d'améliorer les performances du système. On signale également que le choix de ces paramètres peut induire l'instabilité du système. Donc, on propose d'entamer une optimisation basée sur les méthodes évolutionnaires tels que les algorithmes génétiques afin de cerner une plage de confiance pour que le choix de ces paramètres n'affecte pas la stabilité du système.
- Dans notre travail, nous n'avons pas considéré le problème des retards de mesure. Nous proposons la prise en compte de ce facteur lors de la modélisation et la synthèse de la commande.
- L'état du système est supposé accessible dans ce problème. Alors, on propose de l'estimer par des observateurs afin de perfectionner les commandes proposées.

ANNEXE A

ANNEXE A : PARAMÈTRES DU CONCENTRATEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE

<i>Symbol</i>	<i>Description</i>	<i>Valeur</i>
c_f	<i>chaleur spécifique du fluide</i>	$1820 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
ρ_f	<i>densité du fluide</i>	$903 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ν_0	<i>efficacité de l'absorption d'énergie</i>	73%
l	<i>longueur du tube récepteur</i>	142 m
s_f	<i>section du tube</i>	0.0006 m^2

TABLE A.1: Paramètres du concentrateur solaire cylindro-parabolique

- [1] C. A. MOSBAH, Contribution à la commande des systèmes régis par équations aux dérivées partielles.application au concentrateur solaire cylindro-parabolique, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (2017).
- [2] M. S. FERDI, M. A. RAHMOUNI, Commande et optimisation de deux centrales solaires thermiques : A collecteur cylindro-parabolique -a effet de cheminée, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (2016).
- [3] A. Hubert, Thermique ou voltaïque, Ph.D. thesis (2007).
- [4] C. BOUDJEDIR, Z. FENCHOUCHE, Commande et estimation robustes d'une station solaire thermique, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (2015).
- [5] S. Quoilin, Les centrales solaires à concentration, Ph.D. thesis, Université de Liège (2002).
- [6] K. Billal, Modélisation et commande d'un système solaire thermique-dessalement eau de mer, Ph.D. thesis, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE (2013).
- [7] [www.actu environnement.com](http://www.actuenvironnement.com), Ph.D. thesis.
- [8] C. A. Mosbah, M. Tadjine, A. Rebai, M. S. Boucherit, Design of a soft sensor for the estimation of oil temperature in parabolic solar collector, Flow Measurement and Instrumentation 53 (2017) 326–334.
- [9] C. M. Cirre, M. Berenguel, L. Valenzuela, E. F. Camacho, Feedback linearization control for a distributed solar collector field, Control Engineering Practice 15 (12) (2007) 1533 – 1544.
- [10] E. Camacho, F. Rubio, M. Berenguel, L. Valenzuela, A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part i : Modeling and basic control approaches, Solar Energy 81 (10) (2007) 1240 – 1251.

-
- [11] T. A. Johansen, C. Storaa, Energy-based control of a distributed solar collector field, *Automatica* 38 (7) (2002) 1191 – 1199.
- [12] P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov, Cheap two axis sun following device, *Energy Conversion and Management* 46 (7) (2005) 1179 – 1192.
- [13] F. Rubio, M. Ortega, F. Gordillo, M. Lòpez-Martínez, Application of new control strategy for sun tracking, *Energy Conversion and Management* 48 (7) (2007) 2174 – 2184.
- [14] S. Elmetennani, T. M. Laleg-Kirati, New fuzzy approximate model for indirect adaptive control of distributed solar collectors, in : *Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, 2014 IEEE Conference on, 2014, pp. 1–7.
- [15] S. Elmetennani, T. Laleg-Kirati, Fuzzy universal model approximator for distributed solar collector field control, in : *Control (CONTROL)*, 2014 UKACC International Conference on, 2014, pp. 203–208.
- [16] A. Gallego, F. Fele, E. Camacho, L. Yebra, Observer-based model predictive control of a parabolic-trough field, *Solar Energy* 97 (2013) 426 – 435.
- [17] E. F. Camacho, M. Berengul, F. R. Rubio, D. Martinez, *Control of solar Energy systems*, Springer Verlag, 2012.
- [18] C. A. Mosbah, M. Tadjine, M. Chakir, M. S. Boucherit, The zipper : A lyapunov control design for parabolic solar collector, in : *Control Applications (CCA)*, 2016 IEEE Conference on, IEEE, 2016, pp. 279–284.
- [19] C. A. Mosbah, M. Tadjine, M. Chakir, M. S. Boucherit, On the control of parabolic solar collector : The zipper approach, *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 6 (3) (2016) 1100–1108.
- [20] C. A. Mosbah, M. Tadjine, M. S. Boucherit, Min-max lyapunov control for a class of hyperbolic pde with application to parabolic solar collector, in : *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015 16th International Conference on, IEEE, 2015, pp. 689–693.
- [21] J.-W. Wang, H.-N. Wu, H.-X. Li, Distributed fuzzy control design of nonlinear hyperbolic pde systems with application to nonisothermal plug-flow reactor, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 19 (3) (2011) 514–526.
- [22] H.-N. Wu, J.-W. Wang, H.-X. Li, Exponential stabilization for a class of nonlinear parabolic pde systems via fuzzy control approach, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 20 (2) (2012) 318–329.
- [23] J. L. R.N Silva, L.M. Rato, Observer based nonuniform sampling predictive controller for a solar plant, 15 th Triennial World Congress, Barcelona, Spain.

- [24] R. NDE, *Commande hybride avec observation d'un uav de type quadrotor*, Ph.D. thesis, thèse de Magister, université d'Annaba (2010).
- [25] I. Deghboudj, *Commande des systemes non lineaires par mode glissant d'ordre superieur*.
- [26] M. NOUADJA, L. CHACHA, *Commande par mode glissant appliquée à un système électro-énergétique*, Ph.D. thesis (2017).
- [27] H. Abdelli, *Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone à double alimentation.*, Ph.D. thesis, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran (2011).
- [28] A. Benaïssa, M. FELLAH, *Commande par mode de glissement d'un convertisseur ac/dc avec correction du facteur de puissance*, *Acta Electrotehnica* 47 (2) (2006) 67–72.
- [29] B. Vincent, *Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants*, Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN) (2010).
- [30] N. Rachedi, *Commande hybride avec observation d'un uav de type quadrotor*, Ph.D. thesis, thèse de Magister, université d'Annaba (2010).
- [31] K. LAIB, D. MAAMRIA, *Commande d'un quadrirotor*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (2011).
- [32] L. Zadeh, B. Whalen, *On optimal control and linear programming*, *IRE Transactions on Automatic Control* 7 (4) (1962) 45–46.
- [33] P. J. Gawthrop, *Continuous-time self-tuning control : Implementation*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [34] J. Testud, J. Richalet, A. Rault, J. Papon, *Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes*, *Automatica* 14 (5) (1978) 413–428.
- [35] M. Alamir, F. Allgöwer, *Proceedings of the first ifac workshop on nonlinear model predictive control for fast systems nmpc-fs'06*.
- [36] H. Michalska, D. Q. Mayne, *Receding horizon control of nonlinear systems*, in : *Decision and Control, 1989.*, *Proceedings of the 28th IEEE Conference on*, IEEE, 1989, pp. 107–108.
- [37] H. M. . D. Q. Mayne, *Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems*, Vol. 38, IEEE, 1993.
- [38] A. Chemori, N. Marchand, *A prediction based controller for stabilization of a non-minimum phase pvtol aircraft*, in : *Proceedings of the first IFAC Workshop on Nonlinear Model Predictive Control for Fast Systems NMPC-FS'06*, 2006, pp. 65–70.

- [39] V. Zavala, C. Laird, L. Biegler, Fast solvers and rigorous models : Can both be accomodated in nmpc?, in : IFAC Workshop on Nonlinear Model Predictive Control for Fast Systems, plenary talk, 2006, pp. 9–11.
- [40] C. VLAD, Commande prédictive des systèmes hybrides et application à la commande de systèmes en électronique de puissance, Ph.D. thesis, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes (2013).
- [41] M. M. Dabo, Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes, Ph.D. thesis, l'Université de Rouen (2013).
- [42] G. HAFIDI, Application de la commande prédictive non-linéaire à la commande de culture de bactéries escherichia coli, Ph.D. thesis, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes (2008).