

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du projet de fin d'Etude
Pour l'obtention du diplôme de

Master

En

« AUTOMATIQUE »

Option :

« Automatique et Informatique Industrielle »

Titre :

Commande Prédictive d'un Processus
Cylindro-Parabolique

Réalisé par :

- CHERIFI Hamza
- AZIZI Mohamed Chafiq

Encadré par :

Dr. Y. HIMOUR

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord notre Créateur Tout-Puissant nous avoir donné volonté, santé et patience.

Un vif merci à mes parents pour leur soutien indéfectible et la confiance qu'ils ont en mes capacités.

Je tiens à remercier vivement Dr. **HIMOUR** Yacine pour m'avoir soutenu par leur encadrement. Leurs orientations, conseils précieux joints aux encouragements, m'ont sans cesse aidé à me retrouver jusqu'à mener à bien ce travail.

Je remercie tous les enseignants qui m'ont dispensé au long de mon cursus universitaire tant de notions et de savoir.

Je remercie toute la communauté universitaire pour l'apport de chacun de ses éléments qui, à tel ou tel moment de mon parcours, intervenu et aidé à persévérer.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du Jury pour avoir accepté de juger mon travail.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents

Et à nos chers Amies, **Aziz-Zizo** et **Khair-Eddine**

À Ami-**Mhamed KACEMI BEN SOLTAN**

À nos familles

À nos amis

AUX membres de l'**Association el Widad**

AUX membre de **Touta Club™**

À toutes les personnes qui nous ont aidés.

ملخص:

الهدف من هذه الأطروحة يستهدف بشكل رئيسي موضوعين رئيسيين. الأول هو التحكم في الأنظمة التي تحكمها المعادلة التفاضلية الجزئية (PDE) والثاني مخصص لمشكلة استخدام التحكم التنبئي للتحكم في المكثف الشمسي الأسطوانى مكافئ. يكمن الدافع الرئيسي وراء موضوع هذا العمل في الحاجة إلى تقنية فعالة للتحكم في درجة حرارة الخرج لمجمع الطاقة الشمسية المكافئ. يشير المفهوم الرئيسي لهذه الطريقة إلى تصميمات التحكم التي تصف تطور درجة حرارة الزيت المتدفق داخل خط الأنابيب. أخيرًا، يتم تقييم أداء الطرق المقترحة عن طريق اختبارات المحاكاة باستخدام معلمات نظام حقيقية، وفي ظل ظروف تشغيل مختلفة.

Abstract:

The objective of this thesis mainly targets two major subjects. The first is the control of systems governed by the partial differential equation (PDE) and the second is dedicated to the problem of using predictive control-to-control CSCPs. The main motivation behind the subject of this work lies in the need for an efficient technique to control the output temperature of the parabolic solar collector. The main concept of this method refers to control designs, which describe the temperature evolution of an oil flowing inside a pipeline. Finally, the performances of the proposed methods are evaluated by simulation tests using real system parameters, and under different operating conditions.

Résumé

L'objectif de cette mémoire cible principalement deux sujets majeurs. Le premier est le contrôle des systèmes régis par l'équation à dérivées partielles (PDE) et le second est dédié au problème d'utiliser la commande prédictive pour contrôler les CSCPs. La principale motivation derrière le sujet de ce travail réside dans la nécessité d'une technique efficace pour contrôler la température de sortie du capteur solaire parabolique. Le concept principal de cette méthode fait référence aux conceptions de contrôle qui décrit l'évolution de température d'une huile s'écoulant à l'intérieur d'une canalisation. Enfin, les performances des méthodes proposées sont évaluées par des tests de simulation utilisant des paramètres système réels, et dans différentes conditions de fonctionnement.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	5
TABLE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	8
INTRODUCTION GENERAL	9
1 CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS	10
1.1 INTRODUCTION	11
1.2 DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES SOLAIRES A CONCENTRATION (BREF HISTORIQUE)	11
1.3 FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE	13
1.4 DIFFERENTS TYPES DE CENTRALES SOLAIRES	15
1.4.1 CENTRALE A TOUR	15
1.4.2 CENTRALES A COLLECTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE	16
1.4.3 CENTRALES DISH STIRLING PARABOLIQUES	16
1.4.4 CENTRALE SOLAIRE A MIROIRS DE FRESNEL	17
1.5 PRODUCTION D'ELECTRICITE :	17
1.5.1 LA PRODUCTION D'ELECTRICITE EN ALGERIE	18
1.6 CONCLUSION	18
2 CHAPITRE 2 : ETUDE ET MODELISATION DES CHAMPS SOLAIRES A BASE DES CONCENTRATEURS CYLINDRO-PARABOLIQUE	19
2.1 INTRODUCTION	19
2.2 TECHNOLOGIE DES CAPTEURS CYLINDRO-PARABOLIQUES	20
2.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE	20
2.3.1 LES MIROIRS	20
2.3.2 LE TUBE COLLECTEUR	21
2.4 TUBES ABSORBEURS DISPONIBLES DANS LE MARCHE	21
2.4.1 CALCUL DE LA PUISSANCE THERMIQUE POUR LE RECEPTEUR DE TYPE PTR70	22
2.5 MODELISATION DE CSCP	24
2.5.1 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE CSCP	28
2.6 CONCLUSION	32

3	CHAPITRE 3 : COMMANDE PREDICTIVE	33
3.1	INTRODUCTION	33
3.2	PRINCIPE DE LA COMMANDE PREDICTIVE	33
3.2.1	LES AVANTAGES DE LA CP	34
3.2.2	PRELIMINAIRES ET FORMULATION DU PROBLEME	35
3.2.3	SYNTHESE DE LA COMMANDE PREDICTIVE POUR LE CONCENTRATEUR SOLAIRE	35
3.2.4	PREDICTION DU COMPORTEMENT FUTUR DU SYSTEME	35
3.2.5	OPTIMISATION QUADRATIQUE	36
3.2.6	COMMANDE MINIMISANT L'ERREUR PREDITE (MPC1)	36
3.2.7	COMMANDE MINIMISANT LA COMMANDE ET L'ERREUR PREDITE (MPC2)	38
3.3	CONCLUSION	39
4	CHAPITRE 4 : RESULTATS DE SIMULATION SUR MATLAB®	40
4.1	INTRODUCTION	40
4.2	ACUREX :	41
4.3	TEST DE POURSUITE DE REFERENCE :	43
4.4	TEST DE REJET DE PERTURBATIONS :	45
4.4.1	L'EFFET DE LA VARIATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE :	45
4.4.2	L'EFFET DE LA VARIATION SUR TEMPERATURE D'ENTRE :	47
4.5	CONCLUSION :	49
	CONCLUSION GENERAL	50
	BIBLIOGRAPHIE	52

TABLE DES FIGURES

Figure 1 Illustration de la légende de la destruction de la flotte romaine à Syracuse par Archimède [10].	11
Figure 2 Centrale solaire à tour (Solar Two en Californie)	15
Figure 3 CSCP	16
Figure 4 Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLING à Font-Romeu-Odeillo)	16
Figure 5 Centrale solaire à miroirs de Fresnel	17
Figure 6–1 Principe de fonctionnement de la commande prédictive	34
Figure 7 Dynamique du système et présentation des données	42
Figure 8 : Irradiation solaire utilisé dans simulation	43
Figure 9 : La variation de température d'entrée	44
Figure 10 : Test Poursuite de Référence en Créneaux la sortie X10	44
Figure 11: La commande (le débit) U	45
Figure 12: Irradiation solaire utilisé dans simulation	46
Figure 13: Température de la sortie X10	47
Figure 14: La variation de température d'entrée (Tin)	47
Figure 15 la variation de débit U	48
Figure 16 Température de la sortie X10	48

Liste des tableaux

Table 1 montre les caractéristiques de chaque centrale thermique	13
Table 2 les différents tubes récepteurs existant sur le marché	21
Table 3 4.4 L'arrangement du matériel	41
Table 4 Les paramètres du système	43
Table 5 Les conditions de fonctionnement normales	43

Introduction général

La mémoire que nous allons présenter porte d'une part sur la commande d'une classe des systèmes régie par une équation aux dérivées partielles. D'autre part, elle porte sur l'exploitation et l'amélioration des outils classiques de commande et d'estimation d'état afin qu'ils soient adaptés aux problèmes de contrôle et d'estimation liés à cette classe de systèmes.

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.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres de la manière suivante

Le premier chapitre est présenté une entrée sur la centrale solaire thermodynamique et le développement de système solaire

Il contient aussi Fonctionnement et les différents types de la centrale solaire thermodynamique

Avec une explication de la manière de Production d'électricité

Le deuxième chapitre nous présentons le problème de commande du concentrateur solaire cylindro-parabolique (CSCP) comme application au problème étudié dans cette mémoire. Un intérêt particulier sera consacré au problème de contrôle de la température d'un fluide dans ce système. Pour cela, nous avons modélisé le comportement dynamique de la température de ce fluide à partir des lois de la thermodynamique

Dans le troisième chapitre, on propose d'utiliser des techniques de commande basée sur l'optimisation (commande prédictive) 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, on a fait la validité des commandes proposées est prouvée par des tests de simulation

1 CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS

Sommaire :

<u>1.1</u>	<u>INTRODUCTION</u>	11
<u>1.2</u>	<u>DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES SOLAIRES A CONCENTRATION (BREF HISTORIQUE)</u>	11
<u>1.3</u>	<u>FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE</u>	13
<u>1.4</u>	<u>DIFFERENTS TYPES DE CENTRALES SOLAIRES</u>	15
<u>1.4.1</u>	<u>CENTRALE A TOUR</u>	15
<u>1.4.2</u>	<u>CENTRALES A COLLECTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE</u>	16
<u>1.4.3</u>	<u>CENTRALES DISH STIRLING PARABOLIQUES</u>	16
<u>1.4.4</u>	<u>CENTRALE SOLAIRE A MIROIRS DE FRESNEL</u>	17
<u>1.5</u>	<u>PRODUCTION D'ELECTRICITE :</u>	17
<u>1.5.1</u>	<u>LA PRODUCTION D'ELECTRICITE EN ALGERIE</u>	18
<u>1.6</u>	<u>CONCLUSION</u>	18

1.1 INTRODUCTION

La ressource de base la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables est l'énergie solaire, c'est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil, et que la terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de $1,4 \text{ kW/m}^2$ pour une surface perpendiculaire à la direction terre-soleil.

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.

Dans ce chapitre nous allons présenter une idée général sure les différent types de concentrateur solaire et ça technologie

1.2 DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES SOLAIRES A CONCENTRATION (BREF HISTORIQUE)

L'homme utilise l'énergie solaire depuis l'antiquité. Archimède aurait fait brûler les navires romains assiégeant Syracuse en focalisant les rayons du Soleil sur leurs voiles à l'aide de 70 miroirs [1]. Les propriétés optiques de miroirs en paraboles, cercles et ellipses sont clairement mises en évidence sur la Figure 1.1

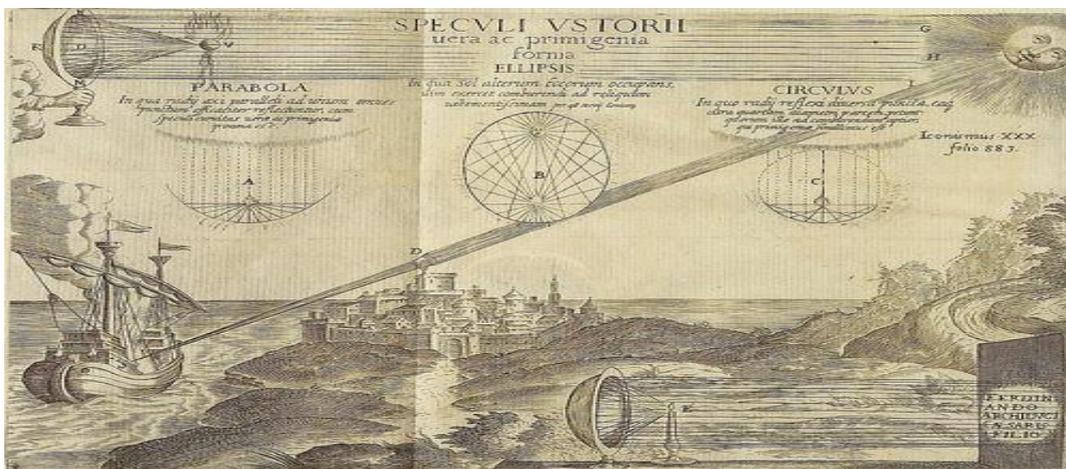


Figure 1 Illustration de la légende de la destruction de la flotte romaine à Syracuse par Archimède [10].

Les premières traces de miroir parabolique remontent à l'antiquité, époque à laquelle les Grecs allumaient la flamme olympique grâce aux seuls rayons du soleil et à un tel miroir. En **1615**, Salomon de Caus construit une pompe solaire, utilisant de l'air chauffé avec le rayonnement solaire [2].

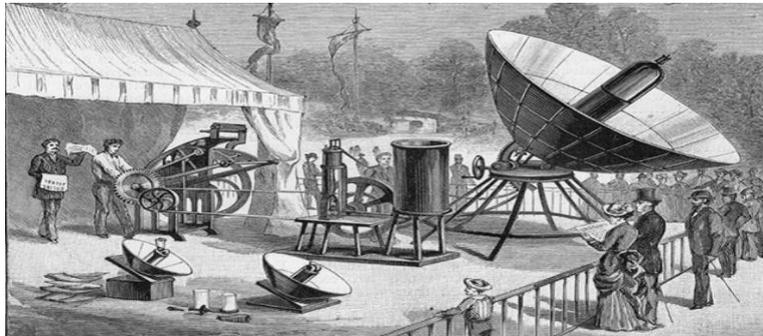


Figure 1.3. L'imprimerie Solaire d'Augustin Mouchot au jardin des Tuileries en 1880 [

La centrale à tour Solar One de 10 MW a été développée en Californie du Sud en **1981**. A la même époque, la société, Luz, entame la construction de neuf centrales thermiques solaires Solar Energy Generating Systems (SEGS). La centrale fait appel à la technologie cylindro-parabolique, qui a été mise



Figure 1.4. Vue montrant une partie de la centrale SEGS en Californie [8].



Figure 1.5 Bloc de puissance d'une centrale SEGS [8].

1

en service en **1984** (Figure 1.4). L'installation SEGS de 354 MW reste aujourd'hui la plus grande centrale d'énergie solaire au monde (Figure 1.5) [3].

Centrale SEGS	1ere année en opération	Puissance de sortie (MW _e)	Température de sortie (K)
I	1985	13,8	580
II	1986	30	589
III & IV	1987	30	622
V	1988	30	622
VI	1989	30	663
VII	1989	30	663
VIII	1990	80	663
IX	1991	80	663

Table 1 montre les caractéristiques de chaque centrale thermique

- La première centrale hybride solaire-gaz en Algérie (SPP1 de Hassi Rmel) a été inaugurée le 14 Juillet **2011** (Figure 1.7). Elle produit 150 MW (puissance nette) avec un apport solaire de 20% de la puissance nominale, soit 30 MW, dont le champ solaire est constitué de capteurs cylindro-paraboliques. En **2015**, 14 centrales électriques photovoltaïques d'une capacité installée de 268 MW ont été mises en service dans les Hauts Plateaux et le sud de l'Algérie [4].

1.3 FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques repose sur la technique suivante :

1. Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
2. La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
3. La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.
4. L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Toute installation thermodynamique solaire doit remplir les mêmes fonctions pour transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec la meilleure efficacité possible. Une centrale solaire thermodynamique est généralement composée de trois étapes (blocs) décrites sur la Figure 1.9 [5] :

- le premier bloc est un système de captation solaire constitué d'un réflecteur/concentrateur, communément appelé champ solaire. Il capte les radiations solaires directes et les concentre vers un récepteur dans lequel s'écoule un fluide caloporteur. Durant cette étape, le rayonnement solaire est converti en puissance thermique.
- le second bloc est un système de production de chaleur à haute température (sous la forme de vapeur d'eau ou d'un autre fluide).
- le troisième bloc est un système de conversion thermodynamique composé de deux éléments: l'élément principal est une turbine qui transforme l'énergie thermique du fluide de travail en énergie mécanique. La turbine couplée à un générateur électrique transforme l'énergie mécanique en électricité. L'électricité ainsi produite peut être injectée sur le réseau électrique de transport et de distribution.

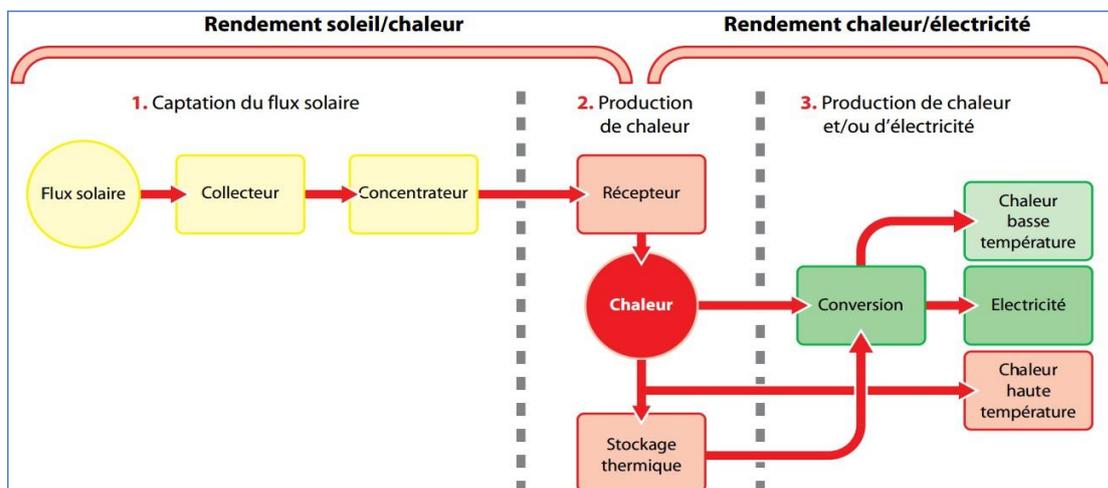


Figure 1.3.1 Eléments clés du processus de transformation de la chaleur du soleil en électricité par voie thermodynamique

1.4 DIFFERENTS TYPES DE CENTRALES SOLAIRES

On distingue les types suivants [6] :

1.4.1 Centrale à tour

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats (voir figure2). Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600° à 1000 c. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à la fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

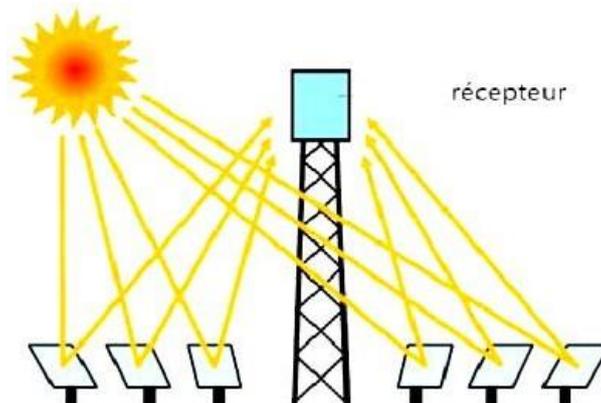


Figure 2 Centrale solaire à tour (Solar Two en Californie)

1.4.2 Centrales à collecteur cylindro-parabolique

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques (Voir Figure 3) qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil.

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal ; dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.

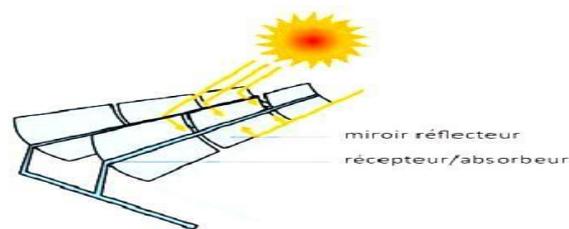


Figure 3 CSCP

1.4.3 Centrales Dish Stirling paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome (voir figure 4). Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration.

Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000°C.

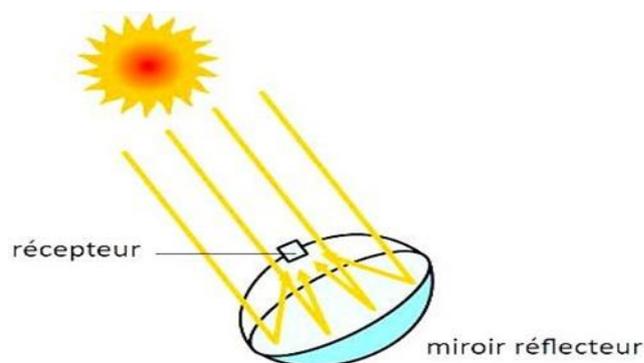


Figure 4 Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLING à Font-Romeu-Odeillo)

1.4.4 Centrale solaire à miroirs de Fresnel

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °c. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.

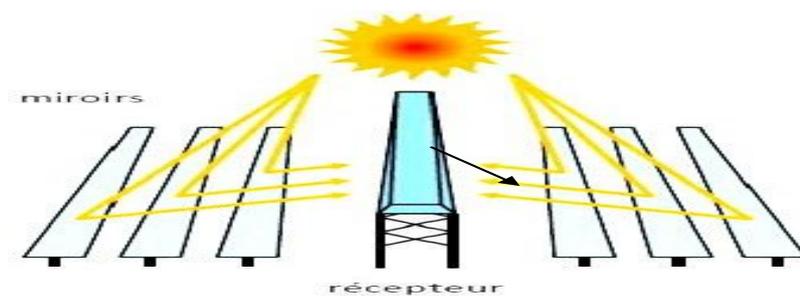


Figure 5 Centrale solaire à miroirs de Fresnel

1.5 Production d'électricité :

La Figure 1.27 montre l'évolution de la production d'électricité par voie solaire thermodynamique dans le monde. Les installations sont localisées dans les régions du globe ayant l'ensoleillement le plus favorable. Jusqu'en 2030, la production électrique augmente d'une façon remarquable. Alors qu'en 2050, plus des trois quarts de l'énergie électrique produite provient de quatre grandes régions du globe : Amérique du Nord, Afrique, Inde et Moyen-Orient [22].

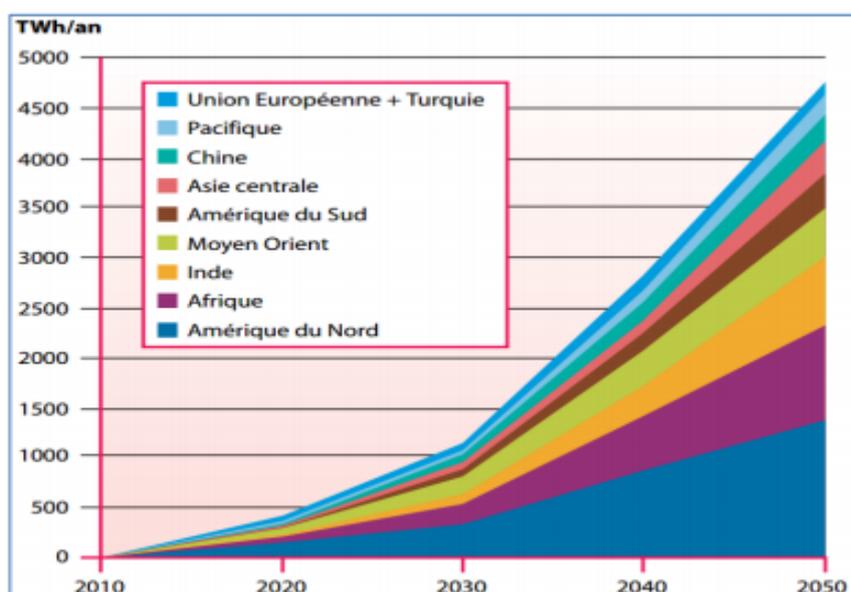


Figure 1.5 Production électrique par voie solaire thermodynamique par région du monde, données historique

1.5.1 La production d'électricité en Algérie

Pour la phase 2021-2030, la filière PV représente 61% des capacités à réaliser contre 23 % pour l'éolien et 11% pour le CSP. Le CSP dont le coût reste élevé avec une croissance relativement lente du développement de son marché à travers le monde, est considéré au-delà de 2021 avec la prévision d'installer de 2000 MW (Figure 1.33) [7].

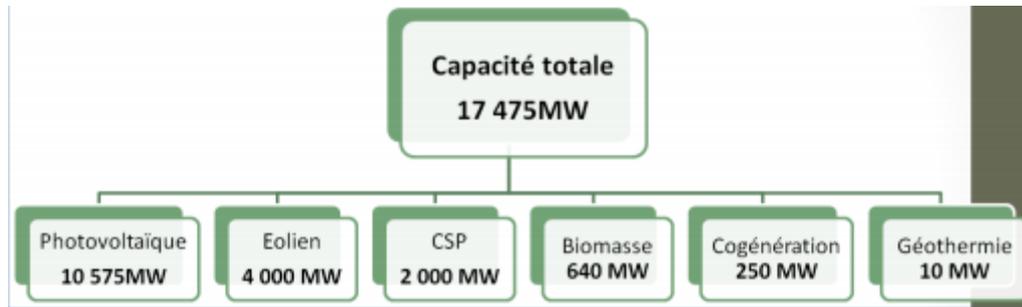


Figure 1.5.1 Répartition des capacités à installer par filière (Deuxième phase 2021-2030) [7]

À l'horizon 2030, et selon le programme de développement des énergies renouvelables adopté en 2011 et révisé en 2015, 37 % de la capacité installée et 27% de la production d'électricité destinée à la consommation algérienne, seront d'origine renouvelable [7].

1.6 CONCLUSION

L'énergie solaire constitue le plus grand potentiel énergétique dont nous disposons sur terre. L'idée d'exploiter cette énergie pour la conversion thermodynamique, bien que relativement ancienne, se matérialise seulement aujourd'hui. Dans le contexte énergétique actuel qui vise à réduire au maximum l'utilisation des combustibles fossiles, le développement des centrales solaires constitue très certainement un enjeu essentiel pour la production d'électricité propre. Au début de ce chapitre, un état de l'art de la conversion thermomécanique de l'énergie solaire, de grande et petite puissance, en mettant l'accent sur les centrales à concentration, a été abordé. Puis, les diverses familles de concentrateurs solaires, ainsi que le contexte de la production d'électricité mondiale propre sont proposés. En fin, la situation actuelle de l'Algérie devant le marché mondiale a été mise en place

2 CHAPITRE 2 : Etude et Modélisation des champs solaires à base des concentrateurs CYLINDRO-PARABOLIQUE

Sommaire :

<u>2.1 INTRODUCTION</u>	19
<u>2.2 TECHNOLOGIE DES CAPTEURS CYLINDRO-PARABOLIQUES</u>	20
<u>2.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE</u>	20
<u>2.3.1 LES MIROIRS</u>	20
<u>2.3.2 LE TUBE COLLECTEUR</u>	21
<u>2.4 TUBES ABSORBEURS DISPONIBLES DANS LE MARCHÉ</u>	21
<u>2.4.1 CALCUL DE LA PUISSANCE THERMIQUE POUR LE RECEPTEUR DE TYPE PTR70</u>	22
<u>2.5 MODELISATION DE CSCP</u>	24
<u>2.5.1 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE CSCP</u>	28
<u>2.6 CONCLUSION</u>	32

2.1 Introduction

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique est un processus industriel d'une grande utilité pour les centrales thermiques. L'objet de ce chapitre porte d'une part sur l'étude et la modélisation de ce système. D'autre part, il porte à introduire le problème de contrôle d'une classe des systèmes régis par une équation aux dérivées partielles (hyperbolique) qui décrit le comportement dynamique de ce système. Le reste de ce chapitre est organisé comme suit :

- Premièrement, nous introduisons le concept du solaire thermique et une brève description de la technologie des concentrateurs solaires.
 - Puis nous présentons le principe de fonctionnement de CSCP et pose le problème de commande
- Finalement, nous terminerons par la modélisation de notre système en se basant sur les lois de la thermodynamique et le bilan énergétique.

2.2 TECHNOLOGIE DES CAPTEURS CYLINDRO-PARABOLIQUES

Un collecteur cylindro-parabolique est le composant de base du champ solaire (Fig. 2.1.a). Il s'agit d'un réflecteur de forme cylindro-parabolique qui concentre le rayonnement solaire sur un récepteur linéaire situé le long de la ligne focale du réflecteur. Ce récepteur est composé d'un tube absorbeur protégé par une enveloppe en verre. L'ensemble est équipé d'un système de poursuite pour suivre la course du soleil. Cette technologie est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire.

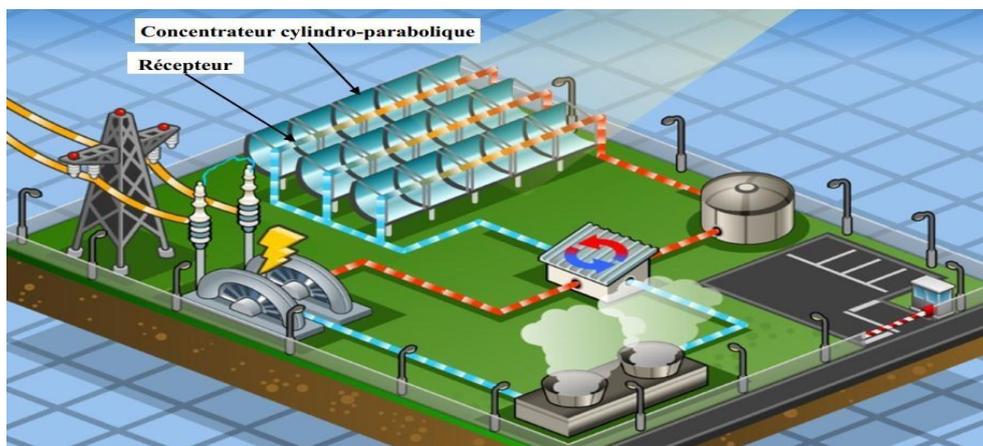


Figure 2.1 Schéma simplifié d'une centrale de type cylindro-parabolique

2.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE

2.3.1 Les miroirs

Pour un collecteur cylindro-parabolique, le miroir est une surface réfléchissante qui permet de collecter et de concentrer le rayonnement solaire incident au foyer du système. Ces miroirs sont composés généralement de verre pauvre en fer avec une bonne transmissivité. 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 [8].

2.3.2 Le tube collecteur

Le tube absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes [9] :

- Bonne absorption du rayonnement (il s'agit d'une couche de cermet d'un composite céramique/métal projeté par plasma) qui joue le rôle d'un absorbeur sélectif (96% d'absorptivité pour 14% d'émissivité à la température de travail), son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs peuvent être très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide. La Figure 2.3 montre un exemple d'un tube absorbeur le plus fréquent et le plus développé commercialement (Schott PTR®70) [9].

2.4 Tubes absorbeurs disponibles dans le marché

Le tableau suivant dresse les différents tubes récepteurs existant sur le marché :

Récepteur	Fabricant	Disponible	Longueur (mm)	Diamètre Extérieur absorbeur	Longueur active	Absorptivité	Emissivité à 400°C	Transmittivité
PTR70	Schott	2007	4.060	70	>90%	95%ISO 95%AS	<10%	≥96%
UVAC 2010	Siemens CSP	2009	4.060	70	96.3%	≥96%	≤9%	≥96.5
HEOI	Archi mède	2011	4.060	70	95%	≥95%	10%	96.5%
HEM S08	Archi mède	2011	4.060	70	95%	≥95%	14% à 580°C	96%

Table 2 les différents tubes récepteurs existant sur le marché [9]

L'état du vide dans les tubes doit être vérifié de temps en temps. La température seuil du tube récepteur, c'est-à-dire, la température au-delà de laquelle on peut indiquer que le tube a perdu le vide, est donnée par la formule suivante :

$$T_{\text{seuil}} = T_{\text{ambt}} + 50 + \frac{T_{\text{huile}} - 300}{3}$$

Où, T_{ambt} , température ambiante en °C, au moment de réaliser la mesure T_{huile} , température du fluide caloporteur (Huile HTF) en °C, au moment de réaliser la mesure. La procédure se base essentiellement sur un thermographe infrarouge qui permet de mesurer la température du tube en verre. Si la température du tube en verre mesurée par le thermographe est inférieure à la température seuil calculée, le tube est dans les bonnes conditions (bon état du vide), sinon, la température du tube en verre mesurée par le thermographe sera supérieure à la température seuil calculée et le tube aura perdu le vide

- Calcul de la puissance thermique Afin de pouvoir visualiser la variation du rendement et la puissance thermique, il est nécessaire de fixer les paramètres suivants :

-Le rayonnement solaire direct incident, 931.98 W/m².

-La vitesse du vent, 6 m/s.

-La température ambiante, $T_a = 298$ K.

-La température du récepteur $T_r = 673$ K.

2.4.1 Calcul de la puissance thermique pour le récepteur de type PTR70

a. Superficie du réflecteur

Pour connaître la puissance et l'énergie totale que génère une centrale, il faut connaître la superficie irradiée qui correspond à l'aire d'ouverture. Cette surface irradiée n'est pas la superficie totale, mais seulement celle couverte par des miroirs. L'aire d'ouverture est inférieure à l'aire disponible. Dans une centrale thermo-solaire CCP, pour chaque hectare de terrain, il y a seulement 0.27 Ha qui font partie de l'aire d'ouverture.

Pour accéder à la superficie nécessaire, il faut connaître les dimensions et le nombre des modules que contient la centrale thermo-solaire d'Aïn Béni Mathar (ABM) :

- L'aire d'ouverture d'un module ABM est,

$$A = 5.77 \times 11.81 = 68.145\text{m}^2$$

-Une boucle à 48 modules, groupés en quatre collecteurs de 12 modules chacun. -L'aire totale de la centrale ABM contenant 56 boucles est de

$$\text{Ouverture totale} = 68.145 \times 56 \times 4 \times 12 = 183170\text{m}^2$$

$$S_{\text{ouverte}} = 183170\text{m}^2$$

La superficie de l'absorbeur est calculée via les données suivantes,

- L'aire d'ouverture d'un absorbeur de la centrale d'ABM est,

$$A = 3.6 \times 0.12 = 0.44\text{m}^2$$

- Un module groupe trois (03) tubes, donc Son total est,

$$S_a = 0.44 \times 3 \times 12 \times 4 \times 56 = 3548\text{m}^2$$

$$S_a = 3548\text{m}^2$$

Le rapport de captation est le facteur de l'énergie reflétée par le réflecteur de la centrale, il vaut,

$$\Gamma = (183170 - 3548)/183170 = 98\%$$

b. Calcul des rendements

Rendement optique Le rendement optique η_{opt} dépend des propriétés du vitrage et de la sélectivité de l'absorbeur, pour la centrale d'ABM η_{opt} est donné par :

$$\eta_{\text{opt}} = 0.98 \times 0.92 \times 0.95 \pm 0.96 = 0.82226$$

$$\eta_{\text{lopt}} = 82.226\%$$

c. Rendement thermique

Le rendement thermique représente la proportion de l'énergie de ventilation que le système permet de récupérer après un bilan incluant différent pertes.

d. Pertes par convection

Le coefficient d'échange convectif

$$h_{cv} = 7.3 \times V^{0.8}, \text{ pour } 4\text{m/s} \leq V \leq 40\text{m/s}, \text{ avec } V, \text{ la vitesse du vent, (6m/s)}$$

$$\text{Ce qui nous donne : } h_{cv} = 7.3 \times 6^{0.8} = 30.6$$

$$P_{cv} = h_{cv} \times S_A \times (T_r - T_a)$$

$$P_{cv} = 30.63548(673298)$$

$$P_{cv} = 40713300\text{W}$$

e. Pertes par rayonnement

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur, mais plus particulièrement la température du récepteur. Ils sont proportionnels à l'émissivité de l'absorbeur.

$$P_{\text{ray}} = \varepsilon \times \sigma \times S_r \times (T_r^4 - T_a^4)$$

$$P_{\text{ray}} = 0.1 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 3548 \times (634^4 - 298^4)$$

$$P_{\text{ray}} = 3968281.385\text{W}$$

f. Pertes globales

Les pertes par conduction sont petites comparées aux pertes par convection ou par rayonnement

$$P_6 = P_{\text{conv}} + P_{\text{ray}} = 44.68158138 \text{ MW}$$

Finalement

$$\eta_{\text{th}} = \frac{(P_c \times \eta_{\text{opt}})}{(P_c \times \eta_{\text{opt}}) + P_G} = 0.758661$$

$$\eta_{\text{th}} = 75.8661\%$$

g. Rendement global

Le rendement global est le reflet de toutes les pertes liées à l'installation du champ solaire, il vaut donc,

$$\eta_g = 82.226\% \times 75.8661\% = 62.3\%$$

Maintenant, on est en mesure de déduire des données précédentes, la puissance thermique pour le récepteur PTR70,

$$P_{th} = P_c \times \eta_{opt} \times \eta_{th}$$

$$P_{th} = 170.711 \times 0.82226 \times 0.758661$$

$$P_{th} = 106.5605725 \text{ MW}$$

P_c est la puissance solaire captée par le réflecteur et qui correspond au produit de l'aire d'ouverture déjà calculée, par le rayonnement solaire direct incident.

$$P_c = 931.98 \times 183170 = 170711 \text{ MW}$$

2.5 Modélisation de CSCP

Après avoir défini l'objectif recherché, il faut définir les variables de contrôle (l'entrée) et la variable à contrôler (la sortie). Figure(5)

- Par la suite, nous devons définir une relation mathématique qui régit le transfert entre l'entrée et la sortie prédéfinies. En d'autres termes, 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

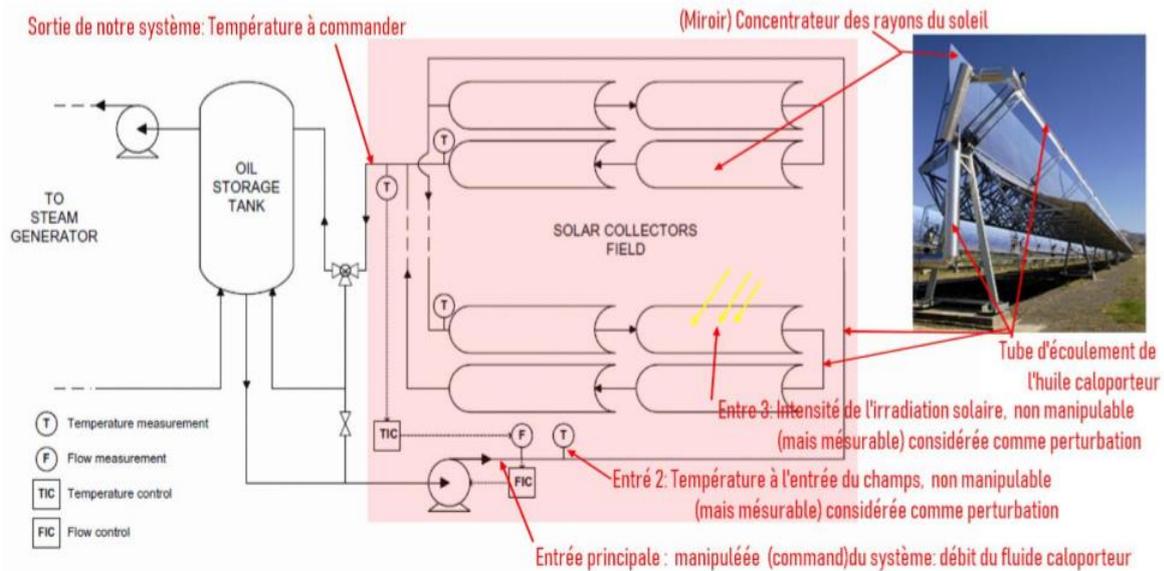


Figure 5 schémas généraux de la partie d'une centrale solaire

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, compris

Entre x et $x+\Delta x$ comme illustré dans la figure (5.1). L'enthalpie accumulée dans le volume de contrôle considéré entre deux instants successifs t et $t+\Delta t$, est donné par la relation suivante

$$E = \rho_f c_f s_f \Delta x (T(x, t + \Delta t) - T(x, t)) \quad \dots \dots (1.1)$$

avec :

s_f : est la superficie de la section du tube.

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

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

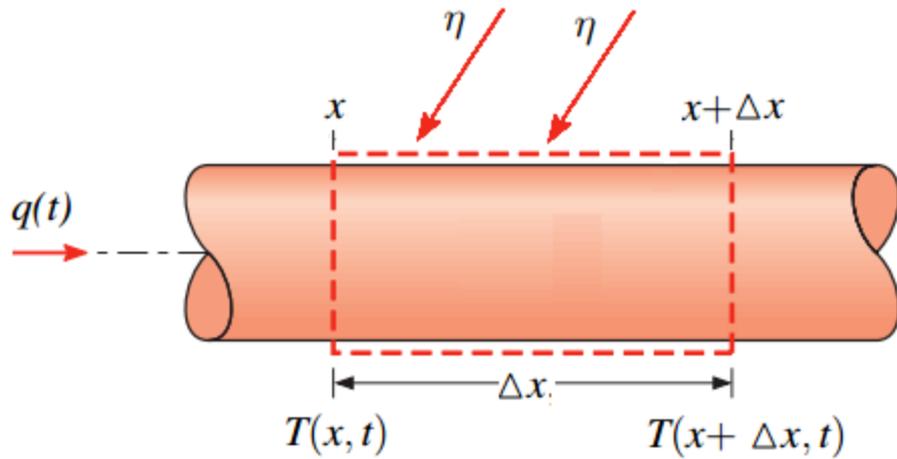


Figure 5.1 : volume de contrôle

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

$$E = E1 + E2 \dots \dots \dots (1.2)$$

Tell que :

- $E1$: 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 :

$$E1 = \rho f c_f q(t) \Delta t (T(x, t) - T(x + \Delta x, t)) \dots \dots (1.3) \quad \text{Ou : } q(t) : \text{ est le débit de fluide.}$$

- $E2$: est l'augmentation d'enthalpie dû à l'énergie solaire à l'intérieur du tube, qui est donnée par :

$$E2 = \alpha \eta \Delta x \Delta t \dots \dots (1.4)$$

Ou 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 (1), (3) et (4) dans (2), mène à :

$$\begin{aligned} & \rho_f c_f s_f \Delta z (T(z, t + \Delta t) - T(z, t)) \\ & = \rho_f c_f q(t) \Delta t (T(z, t) - T(z + \Delta z, t)) + \alpha \eta \Delta z \Delta t \dots (1.5) \end{aligned}$$

La division de (5) par $\Delta t \Delta z$ mène à l'équation suivante :

$$\rho_f c_f s_f \frac{T(z, t + \Delta t) - T(z, t)}{\Delta t} = \rho_f c_f q(t) \frac{T(z, t) - T(z + \Delta z, t)}{\Delta z} + \alpha \eta \quad (1.6)$$

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

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} + \frac{q(t)}{s_f} \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \quad \dots\dots\dots(1.7)$$

Le modèle (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.

$$\underbrace{\frac{\partial [T(z, t)]}{\partial t} + \left[\frac{q(t)}{s_f} \right] \frac{\partial [T(z, t)]}{\partial z}}_{\substack{\text{Vitesse} = u(t) \\ s(t)}} = \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \} \dots\dots\dots(8)$$

Finalement, il reste à définir les conditions aux limites relatives à l'équation (1.8). Pour cela nous considérons le domaine spatial borné $z \in [0, l]$ à cause de la limitation de la longueur du tube-récepteur.

$$C.L \begin{cases} T(0, t) = T_o(t) \\ T(l, t) = T_{out}(t) \end{cases} \dots\dots\dots(8.1)$$

2.5.1 Comportement dynamique de CSCP

Le modèle [9] décrit d'une façon implicite la relation entre la commande et la sortie. Afin d'avoir une relation explicite entre ces deux grandeurs, on est invité à résoudre l'équation à la dérivée partielle. La solution de cette équation va nous offrir la possibilité d'étudier le comportement dynamique du système sans avoir besoin de simulation numérique. Par exemple, pour vérifier que la relation entre la température du fluide et sa vitesse est inversement proportionnelle, il suffit de vérifier que la dérivée de l'un par rapport à l'autre est négative. Pour cela, nous recourons aux méthodes analytiques de résolution d'EDP. Dans notre manuscrit on se limite à la méthode des caractéristiques dû à sa simplicité.

2.5.1.1 Méthode des caractéristiques

Pour une EDP du premier ordre, la méthode des caractéristiques consiste à chercher des courbes, appelées ligne caractéristiques, le long desquelles l'équation aux dérivées partielles se réduit à une simple équation différentielle ordinaire. La solution de l'ODE le long de la ligne caractéristique permet de retrouver la solution du problème original.

2.5.1.2 Equation homogène :

Considérons l'équation homogène définie comme suit :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(8.2)$$

On cherche une ligne caractéristique (t, z(t)) le long de laquelle l'EDP (8.2) se réduit à une équation différentielle ordinaire.

Calculons la dérivée de T(x, t) le long d'une telle courbe :

$$\frac{dT(z(t),t)}{dt} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \dots\dots(8.3)$$

On remarquera aisément qu'en imposant $\frac{dz}{dt} = u(t)$ on obtient :

$$\frac{dT(z(t),t)}{dt} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} u(t) + \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = 0 \dots\dots(8.4)$$

Il vient ainsi deux équations différentielles ordinaires à résoudre :

$$\frac{dz}{dt} = u(t) \dots\dots(8.5)$$

$$\frac{dT(z(t),t)}{dt} = 0 \dots\dots(8.6)$$

La solution de (8.2) reste constante le long de chaque ligne caractéristique. La valeur de la solution en un point x peut donc être retrouvée en cherchant la valeur de la condition initiale à l'origine x_0 tel que :

$$z_0 = z - \int_{t_0}^t u(\sigma) d\sigma \dots(8.7)$$

En conséquence, on peut vérifier que la fonction $\psi(x, t)$ définie ci-dessous est une solution de l'équation homogène (2.10) :

$$\psi(z, t) = z - \int_{t_0}^t u(\sigma) d\sigma \dots(8.9)$$

2.5.1.3 Equation Non-Homogène :

Considérons maintenant l'équation non-homogène définie comme suit :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = s(t) \dots\dots\dots(8.10)$$

Pour résoudre cette équation nous introduisons les changements de variables suivants :

$$\xi_1 = \psi(z, t) \dots\dots\dots (8.11)$$

$$\xi_2 = t \dots\dots\dots(8.12)$$

Les dérivées partielles de $T(x, t)$ le long de la courbe (ξ_1, ξ_2) peuvent s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_1} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial t} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_1} \frac{\partial \psi(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_2} \dots\dots\dots(8.13)$$

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_1} \frac{\partial \xi_1}{\partial z} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial z} = \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_1} \frac{\partial \psi(z,t)}{\partial z} \dots\dots\dots \dots(8.14)$$

En substituant (8.13) et (8.14) dans (8.10), on obtient :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_2} + \frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_1} \left[\frac{\partial \psi(z,t)}{\partial t} + u(t) \frac{\partial \psi(z,t)}{\partial x} \right] = s(t) \dots\dots(8.15)$$

Prenons en considération que $\psi(x, t)$ est une solution de l'équation homogène, on obtient :

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial \xi_2} = s(t) \dots\dots\dots(8.16)$$

Comme on peut le voir, l'équation aux dérivées partielles se réduit à une simple équation différentielle ordinaire. En conséquence, la solution de l'équation (2.23) est donnée comme suit :

$$T(z, t) = T(z, 0) + \int_{t_0}^t s(\sigma) d\sigma \dots\dots\dots(8.17)$$

En inversant le changement de variable, on trouve la solution finale donnée par (8.18)

$$T(z, t) = T(z - \int_{t_0}^t u(\sigma) d\sigma, 0) + \int_{t_0}^t s(\sigma) d\sigma \dots\dots(8.18)$$

L'équation (8.18) décrit d'une façon explicite la relation entre le début du fluide et sa température.

2.5.1.4 Simplification du Modèle

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

$$\begin{cases} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = s(t), z \in \Omega, t \in R^+ & (9a) \\ T(z, 0) = T_0(z), z \in \Omega & (9b) \\ y(t) = T(L, t), t \in R^+ & (9c) \end{cases}$$

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 (9) correspondent aux regroupements paramétriques suivant :

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

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 :

$$\forall z \in [z_i - \Delta z, z_i],$$

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = \frac{T(z_i,t) - T(z_i - \Delta z,t)}{\Delta z} \quad (10)$$

En substituant cette approximation dans le modèle EDP (9), on obtient le modèle ODE suivant :

$$\forall z \in [z_i - \Delta z, z_i], \frac{dT(z,t)}{dt} = -u(t) \frac{T(z_i,t) - T(z_i - \Delta z,t)}{\Delta z} + s(t) \dots\dots\dots(11)$$

Pour écrire le modèle (11) sous une représentation d'état, nous considérons la variable d'état suivante :

$$x_i(t) = T(z_i, t)$$

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

$$x(t) = [x_1(t) \quad \dots \quad x_n(t)] \dots\dots\dots(12)$$

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

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bs(t) + DT_{in}(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (13)$$

où :

$$A = \begin{bmatrix} -u(t) & 0 & \dots & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & u(t)I_{n-1} & \ddots & 0 \\ & & & -u(t) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, C^T = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(14)$$

Tel que :

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

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de commande d'un système de production d'énergie régi par équation aux dérivées partielles. Dans un premier lieu, nous avons présenté le contexte global de de notre application et exposé les différentes technologies des concentrateurs solaires. Par la suite, on a mis en évidence le problème de commande qui a fait l'objet de notre travail et les différentes techniques qui ont été proposées pour remédier à ce problème. Finalement, une modélisation mathématique du comportement dynamique de ce système est synthétisée en utilisant les lois de conservation d'énergie. A travers ce chapitre on a pu constater la grande importance du problème traité dans cette mémoire dans le secteur industriel et on s'est familiarisé avec la technologie des concentrateurs solaires. Dans le chapitre suivant, nous concentrons sur la commande de ce système.

3 Chapitre 3 : Commande prédictive

Sommaire :

<u>3.1 INTRODUCTION</u>	33
<u>3.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE PREDICTIVE</u>	33
<u>3.2.1 LES AVANTAGES DE LA CP</u>	34
<u>3.2.2 PRELIMINAIRES ET FORMULATION DU PROBLEME</u>	35
<u>3.2.3 SYNTHESE DE LA COMMANDE PREDICTIVE POUR LE CONCENTRATEUR SOLAIRE</u>	35
<u>3.2.4 PREDICTION DU COMPORTEMENT FUTUR DU SYSTEME</u>	35
<u>3.2.5 OPTIMISATION QUADRATIQUE</u>	36
<u>3.2.6 COMMANDE MINIMISANT L'ERREUR PREDITE (MPC1)</u>	36
<u>3.2.7 COMMANDE MINIMISANT LA COMMANDE ET L'ERREUR PREDITE (MPC2)</u>	38
<u>3.3 CONCLUSION</u>	39

3.1 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 system (linéaires ou non). Elle a fait ses débuts en 1962 suite aux travaux de Zadeh et Whalen, [10] dans [11]. Elle sera connue plus tard dans le monde industriel, particulièrement dans le secteur de la pétrochimie, suite aux travaux de Richalet et al. [12] à cause de la dynamique lente des systèmes pétrochimiques. Grâce à sa capacité à prendre en compte les contraintes, à contrôler les systèmes multi variables 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,[13]. Au fil du temps, beaucoup d'améliorations ont été faites sur cette technique, notamment les travaux de Mayne et Michalska [14] et Michalska et Mayne [15]. Aujourd'hui, elle est également adaptée à la commande des systèmes rapides [16, 17].

3.2 Principe de la commande prédictive :

Le principe de la commande prédictive [18] consiste à optimiser une fonction de coût, qui décrit l'objectif de contrôle sur un horizon de temps fini. Afin de calculer la séquence de commandes qui optimise le critère défini, le contrôleur dispose d'un modèle (mathématique) du processus pour prédire son comportement. A chaque instant, une séquence de commandes optimales en boucle ouverte, minimisant la fonction de coût, sur

l'horizon de prédiction est calculée, mais seul le premier élément est appliqué au système. Cette procédure est reprise à la période d'échantillonnage suivante (figure 6.1)

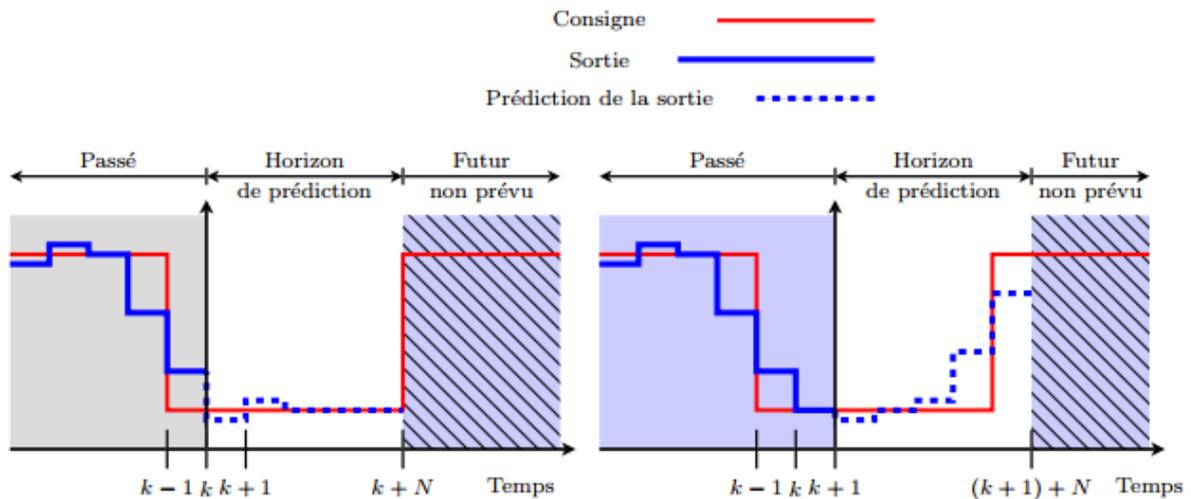


Figure 6-1 Principe de fonctionnement de la commande prédictive

3.2.1 Les avantages de la CP

- L'idée générale est intuitive et facile à comprendre.
- Permet de respecter les contraintes sur les variables contrôlées et manipulées.
- Evite des variations excessives sur les variables manipulées, la commande est plus douce. Cela permet une meilleure utilisation des actionneurs (vérins, vannes, moteurs) et leur temps de vie est ainsi augmenté.
- En cas de perturbations mesurables, le système s'adapte automatiquement.
- Permet en général un réel gain financier.

3.2.2 Préliminaires et formulation du problème

En utilisons 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 [19]. Par la suite, le contrôleur résultant est réduit pour faciliter sa mise en œuvre et son implémentation sur des cartes de commande.

3.2.3 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.

3.2.4 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 :

$$\hat{y}(t + \sigma) = y(t) + \sigma \frac{dy(t)}{dt} + \sum_{i=2}^n \frac{\sigma^i}{i!} \frac{d^i y(t)}{dt^i} + R(\sigma^n) \dots\dots(1)$$

Si on considère que t est l'instant présent, $t + \sigma$ 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 :

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

En réécrivant cette équation sous forme matricielle, on obtient :

$$\hat{y}(t + \sigma) = [1 \quad \sigma \quad \dots \quad \sigma^n/n!] \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{bmatrix} \dots\dots(3)$$

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

$$\hat{y}_r(t + \sigma) = [1 \quad \sigma \quad \dots \quad \sigma^n/n!] \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \vdots \\ y_r^{(n)} \end{bmatrix} \dots\dots(4)$$

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 :

$$e(t) \triangleq y(t) - y_r(t) \dots\dots(5)$$

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

$$\hat{e}(t + \sigma) = \hat{y}(t + \sigma) - \hat{y}_r(t + \sigma) \dots\dots(6)$$

En substituant (3) et (4) dans (6), on obtient :

$$\hat{e}(t + \tau) = \Phi(\tau)\Theta(t) \dots\dots(7)$$

$$\Phi^T(\tau) \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ \tau \\ \vdots \\ \tau^n/n! \end{bmatrix}; \Theta(t) \triangleq \begin{bmatrix} y - y_r \\ \dot{y} - \dot{y}_r \\ \vdots \\ y^{(n)} - y_r^{(n)} \end{bmatrix} \dots\dots(8)$$

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

3.2.5 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 la 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.

3.2.6 Commande minimisant l'erreur prédite (MPC1)

Théorème 4.1 :

Considérons le système régi par le modèle (1.7). Si la loi de commande définie ci-dessous est appliquée à l'entrée de ce système,

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r + \frac{3}{2T} e \right) \dots\dots(9)$$

Où : 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 :

$$J(t) \triangleq \frac{1}{2} \int_0^T \hat{e}(t + \tau)^2 d\tau \dots\dots(10)$$

- t est l'instant présent.
- $\tau \in [t, t+T]$ 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.

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

$$\begin{aligned}
 J(t) &= \frac{1}{2} \int_0^T \Theta^T(t) \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) \Theta(t) d\tau \\
 &= \frac{1}{2} \Theta^T(t) \left(\int_0^T \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) d\tau \right) \Theta(t) \dots\dots\dots(11)
 \end{aligned}$$

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 système 1. 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 :

$$\int_0^T \Phi^T(\tau) \Phi(\tau) d\tau = \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(12)$$

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

$$J(t) = \frac{1}{2} \Theta^T(t) \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) \dots\dots\dots (13)$$

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

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \dots\dots\dots(14)$$

En conséquence,

$$\left(\frac{\partial \Theta(t)}{\partial u} \right)^T \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) = 0 \dots\dots\dots(15)$$

Après quelque développement analytique nous obtenons la commande suivante :

$$u(t) = \frac{\Delta z}{x_n - x_{n-1}} \left(\frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta - \dot{y}_r + \frac{3}{2T} e \right) \dots\dots\dots(16)$$

Ce qui termine la preuve.

3.2.7 Commande minimisant 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

Théorème 4.2 :

Considérons le système régi par le modèle (1.7). Si la loi de commande définie ci-dessous est appliquée à l'entrée de ce système,

$$u(t) = \frac{\frac{2T}{3} \left(\dot{y}_r - \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \right) - e}{\frac{4}{T^2 X} + \frac{2}{3} T X} \dots\dots\dots(17)$$

Où :

$$X = \frac{x_{n-1} - x_n}{\Delta z} \dots\dots\dots(18)$$

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 :

$$J(t) \triangleq \frac{1}{2} \int_0^T \hat{e}(t + \tau)^2 d\tau + u^2(t) \dots\dots\dots(19)$$

- T est l'horizon de prédiction.
- t est l'instant présent.
- $\tau \in [t, t+T]$ 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 T . Par analogie avec la commande prédictive précédente, on obtient :

$$J(t) = \frac{1}{2} \Theta^T(t) \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) + u^2 \dots\dots\dots(20)$$

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

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \dots\dots\dots(21)$$

En conséquence,

$$\left(\frac{\partial \Theta(t)}{\partial u}\right)^T \begin{bmatrix} T & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^2}{2} & \frac{T^3}{3} \end{bmatrix} \Theta(t) + 2u = 0 \dots\dots\dots(22)$$

Après quelque développement analytique nous obtenons la commande suivante :

$$u(t) = \frac{\frac{2T}{3} \left(\dot{y}_r - \frac{\alpha}{\rho_f c_f s_f} \eta \right) - e}{\frac{4}{T^2 x} + \frac{2}{3} T x} \dots\dots\dots(23)$$

Ce qui termine la preuve.

3.3 Conclusion :

L'objectif du ce chapitre est de présenter une solution de commande de type prédictif, à critère quadratique, pour la régulation de température de sortie dans un CSCP a occupation intermittente.

La première partie présente un algorithme de commande, sans tenir compte des contraintes. Pratiquement la séquence de commande à appliquer aux procédés industriels n'est plus libre, de ce fait le problème d'optimisation sera reformuler de nouveau et résolu par une méthode de programmation non-linéaire, ce qui est l'objectif de la deuxième partie.

4 CHAPITRE 4 : Résultats de simulation sur MATLAB®

4.1 INTRODUCTION	40
4.2 ACUREX	41
4.3 TEST DE POURSUITE DE REFERENCE	43
4.4 TEST DE REJET DE PERTURBATIONS	45
4.4.1 L'EFFET DE LA VARIATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE	45
4.4.2 L'EFFET DE LA VARIATION SUR TEMPERATURE D'ENTRE	47
4.5 CONCLUSION	49

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une application sur les notions de la commande prédictive et faire des études sur le comportement d'un système ACUREX.

L'approche MPC, l'action de contrôle actuelle est calculée en ligne plutôt que d'utiliser une loi de contrôle pré-calculée, hors ligne.

Un contrôleur prédictif modèle utilise, à chaque instant d'échantillonnage, les mesures d'entrée et de sortie actuelles de système, l'état actuel de ACUREX pour

- calculer, sur un horizon fini, une future séquence de contrôle qui optimise un indice de performance donné et satisfait les contraintes sur l'action de contrôle
- utiliser le premier contrôle de la séquence comme entrée de système

4.2 ACUREX

ACUREX est une centrale solaire située dans le désert de Tabernass (Espagne) et c'est l'une des usines expérimentales disponibles du complexe PSA (Centrale solaire d'Almeria).

Il consiste d'une série de miroirs paraboliques qui réfléchissent le rayonnement solaire sur un tuyau où l'huile se réchauffe en circulant.

L'objectif du système de contrôle dans un collecteur distribué est de maintenir la température

- Lorsque le débit (U) varie d'une façon croissante la température de sortie (X_{10}) subie à une variation décroissante est 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.
- Si la irradiation (Ir) et température d'entrer (T_{in}) varient d'une façon croissante la sortie doit être augmenté d'une façon croissante

de l'huile de sortie à un niveau malgré les perturbations telles que les changements de niveau d'irradiation (causé par les nuages), réflectivité du miroir ou température de l'huile d'entrée. Puisque le rayonnement solaire ne peut pas être ajusté, cela ne peut être réalisé qu'en ajustant l'huile couler. [20]

Paramètre	Valeur
le nombre de capteurs solaires distribués	3456
rangées disposées de collecteurs	48 rangées
L'espacement des rangées entre collecteurs parallèles	3 m
Le nombre des boucles parallèles	24 boucles
La longueur de chaque boucle	480 m
Le nombre des modules dans chaque boucle	8
Le nombre des collecteurs dans chaque module	18
Les dimensions des collectionneurs	3 × 1.82 m
Le type de l'huile utilisé	C_{Po}
Type de tube utilisé (récepteur)	PTR70

Table 3 4.4 L'arrangement du matériel [20]

Dans le test suivant : nous avons fait une simulation de système ACUREX à travers des valeurs real mesuré

Notre système ACUREX contient quatre variables :

Les entrées :

- La température d'enter (T_{in})
- L'irradiation solaire (I_r)
- Le débit de fluide (huile caloporteur) (U)

La sortie :

- La température de sortie (X_{10})

Les résultats de simulation sont montrés dans la figure suivante :

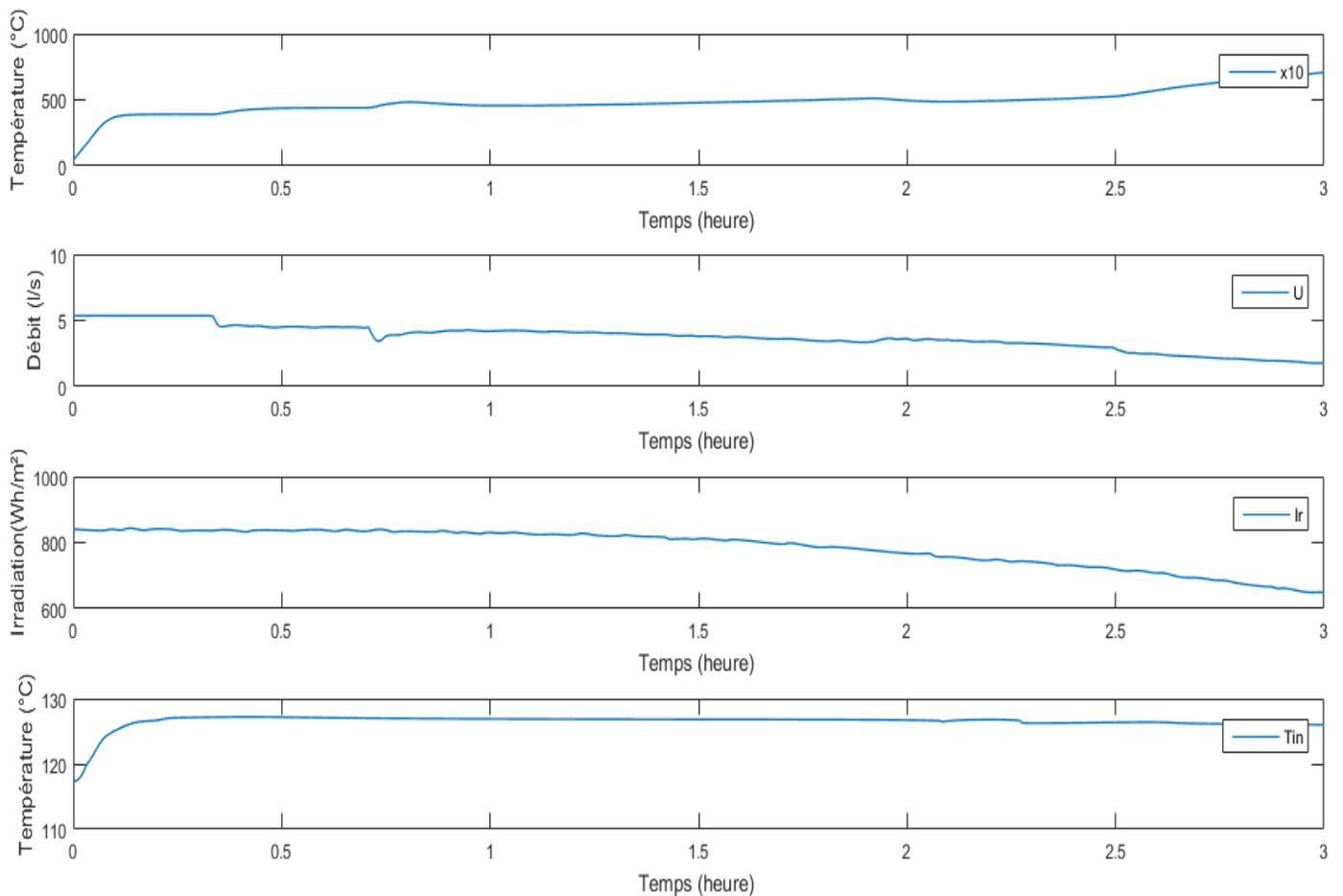


Figure 7 Dynamique du système et présentation des données.

4.3 Test de Poursuite de Référence :

Pour cela, nous choisissons une référence caractérisée dynamique : " **Référence en Variable** ".

Les paramètres de simulation choisie dans ce test sont illustrés dans le tableau.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures.(8.9.10 et 11)

Paramètre	Valeur
Temps d'échantillonnage	15 s
Nombre de segments le long de la variable d'espace	10
Ouverture optique du miroir	1.82
Efficacité optique du miroir	0.675 LF
Longueur du canal	1440 m
Le nombre segment selon les variables d'espace	10

Table 4 Les paramètres du système

Paramètre	Condition
Débit (U)	$3.77 < U < 22.64$ l/s
Température l'huile	$T < 305^{\circ}\text{C}$

Table 5 Les conditions de fonctionnement normales

Les entrées :

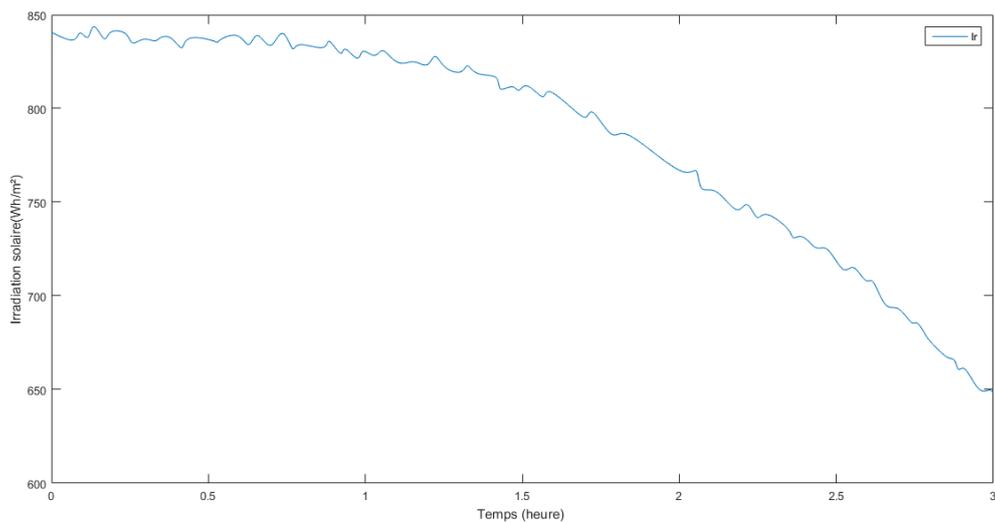


Figure 8 : Irradiation solaire utilisé dans simulation

Résultats :

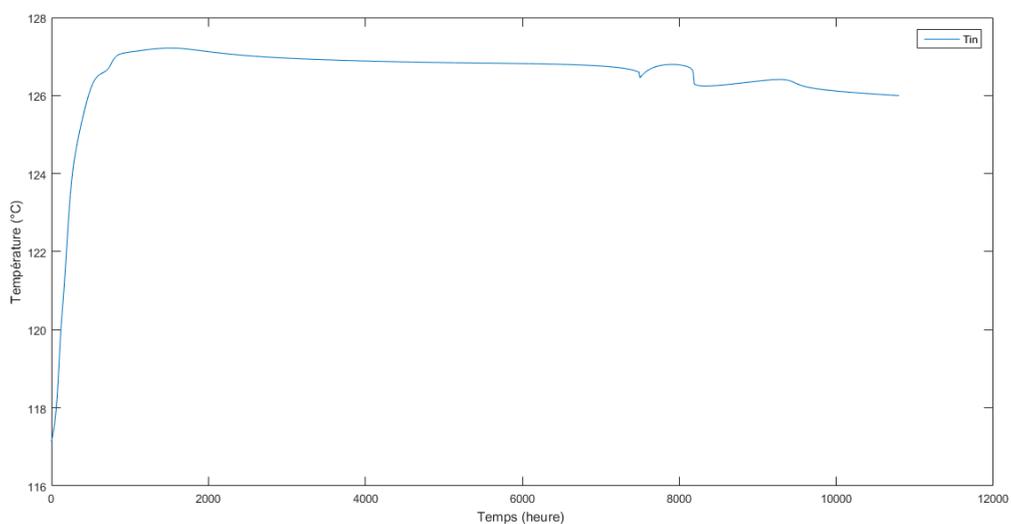


Figure 9 : La variation de température d'entrée

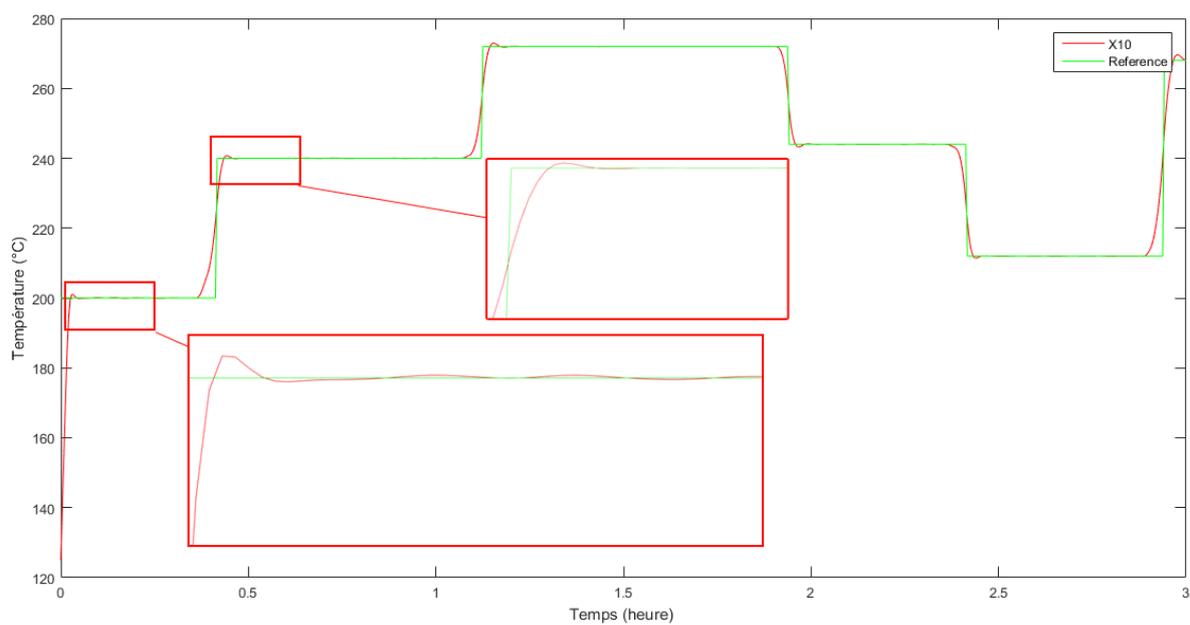


Figure 10 : Test Poursuite de Référence en Créneaux la sortie X10

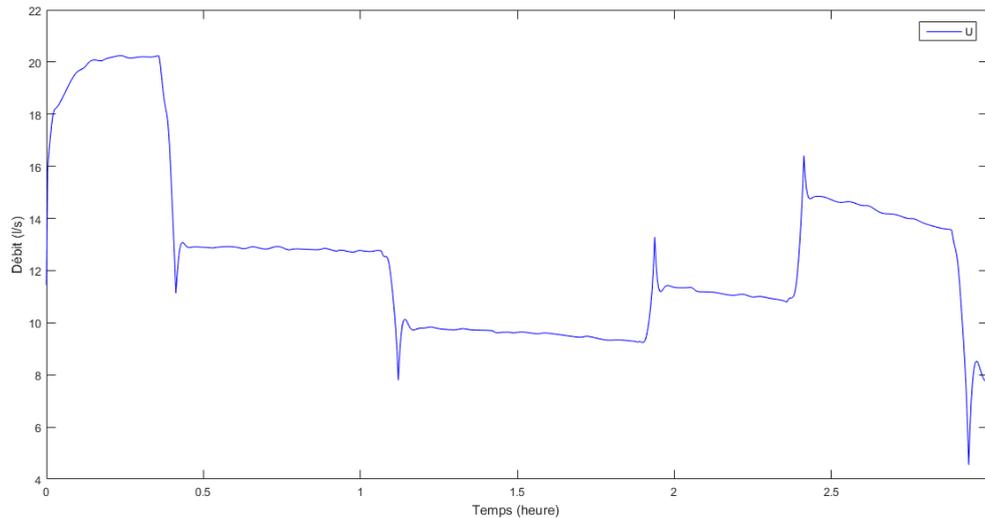


Figure 11: La commande (le débit) U

A partir de ces résultats, on peut remarquer que la température de sortie suit efficacement la référence désirée.

4.4 Test de rejet de perturbations :

Dans ce test nous souhaitons évaluer les performances de rejet des deux perturbations principales que peut subir notre système, à savoir des variations brutes sur l'intensité de l'irradiation (passage de nuage), ou bien des fluctuations de la température d'entrée T_{in} (passage d'un nuage).

Pour cela, nous choisissons une référence caractérisée statique : "**Référence constant**".

4.4.1 L'effet de la variation de l'irradiation solaire :

Étude l'effet de la variation de l'irradiation solaire (I_r) sur la sortie de la valeur désirée avec référence qui égale à **250 °C**

Comme le montre la courbe dans la figure suivante, nous avons simulé le passage d'un nuage par l'ajout d'une variation sur la profile de la radiation utilisé précédemment, qui fait tomber la valeur d'environ 800 à 250 Wh/m^2 et cela à partir de l'instant $k = 24$ à $k=54$

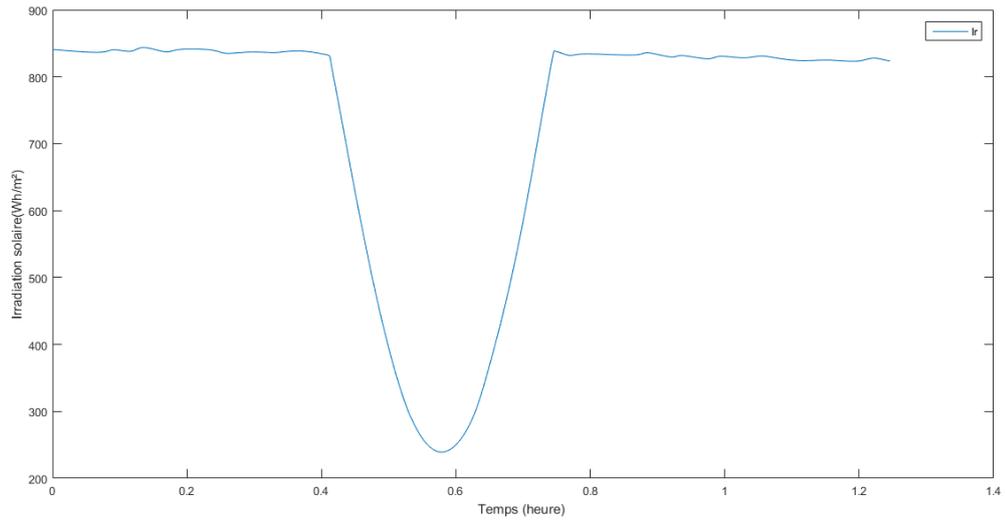


Figure 12: Irradiation solaire utilisé dans simulation

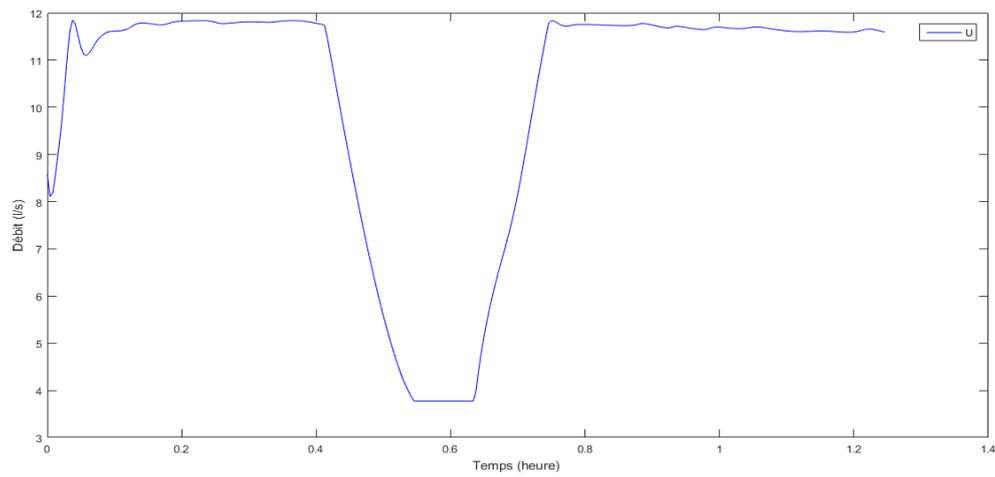


Tableau 1: la variation de débit(U)

En Remarque que le débit de fluide est diminué au limite des conditions de fonctionnement normal

Au but de régulation de température demander (référence désiré)

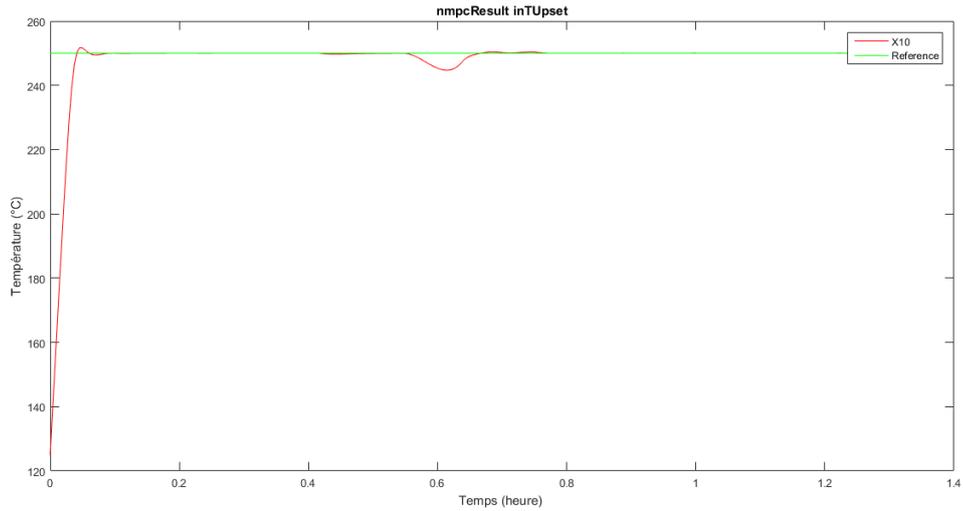


Figure 13: Température de la sortie X10

La valeur de la déviation est 0.5 °C et le temps nécessaire pour faire revenir à la valeur désiré Égale à 6 Min, donc Notre régulateur à bien fait retourner la valeur de sortie à la valeur de la référence.

4.4.2 L'effet de la variation sur Température d'entré :

Étude l'effet de la variation de température d'entré (T_{in}) sur la sortie de la valeur désirée avec référence qui égale à **250 °C**

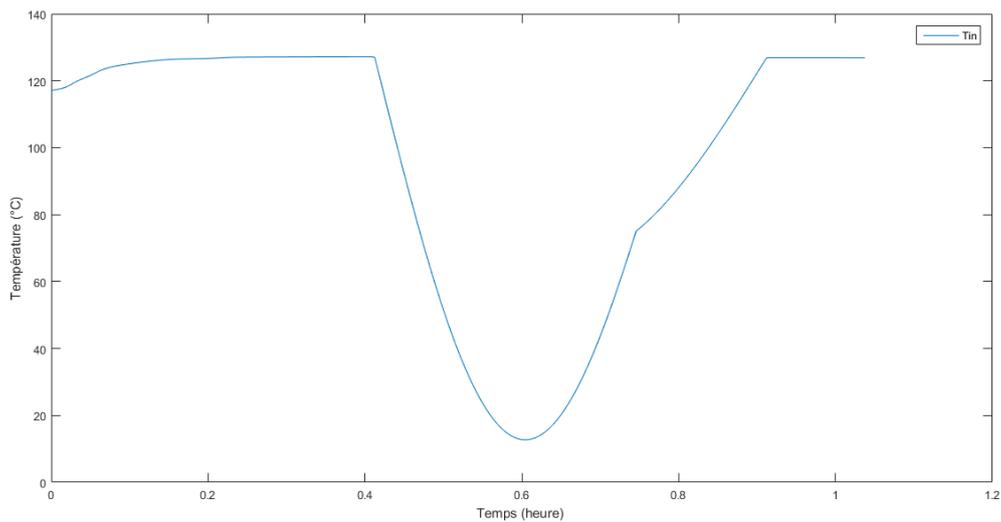


Figure 14: La variation de température d'entrée (T_{in})

EN Remarque que la valeur la température d'entré est tombé de 123 à 12.73 °C dans une durée de 11 Min et re-augmenté a la valeur 126.9°C .

Réponse de système :

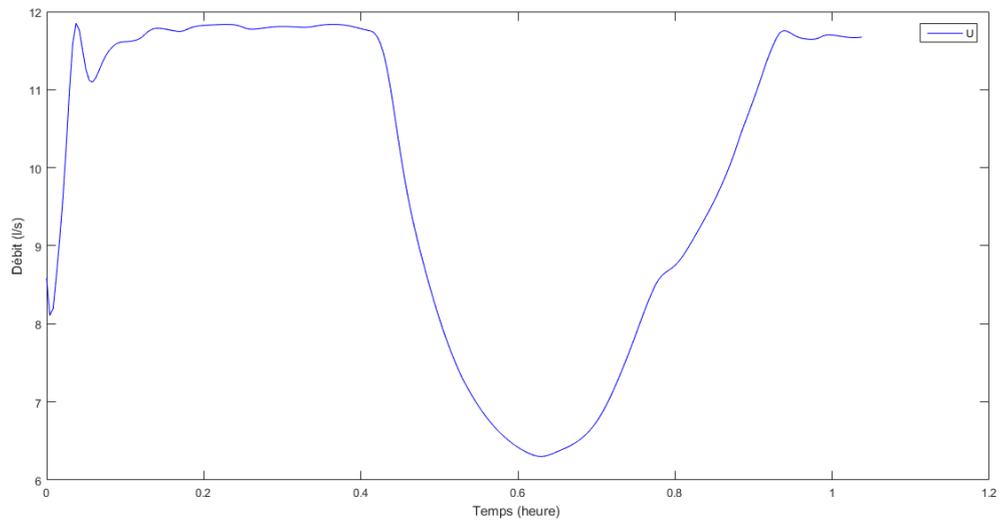


Figure 15 la variation de débit U

En remarque que la valeur de débit est diminué de 11.8 à 6 L/S au but de donner un temps plus pour bien chauffé et fait régulée la température de sortie

Le graphe suivant montre comment la température au point X₁₀ est régler

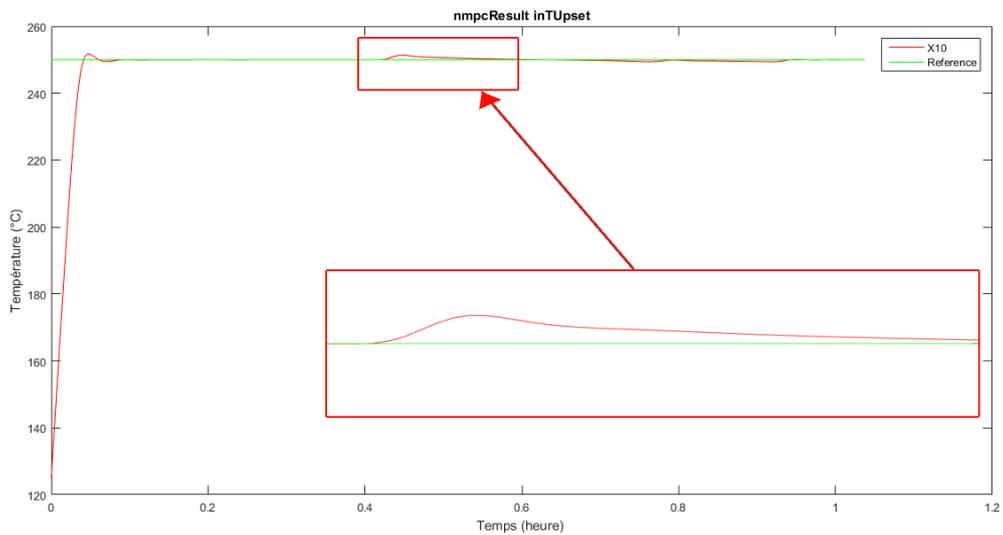


Figure 16 Température de la sortie X₁₀

Donc, en peut dire Notre régulateur à bien fait retourner la valeur référence et bien rejet les perturbations

4.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre on a fait deux types de test « **Poursuite** » et « **Rejet de perturbations** » pour vérifier l'efficacité et la stabilisation de notre système

Nous avons proposé au cours de ce chapitre l'exécution d'un script qu'on a généré sur MATLAB pour appliquer la commande prédictive, synthétisées à base d'un principe d'optimisation et des fonctions MATLAB précises, 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 météorologiques.

Conclusion général

L'ensemble de ce mémoire est dédié au développement de stratégies MPC distribuées, appliquées à la régulation thermique de système ACUREX quatre classes de problèmes ont été étudiées dans les chapitres précédents

- La modélisation de système ACUREX
- La simplification de système pour résoudre une équation à la dérivée partielle
- Le contrôle de système par la commande prédictive
- Programmation sur Matlab et simulation de script

Dans le premier chapitre on a présenté une idée général sur les différents types de concentrateur solaire et sa technologie

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié le comportement dynamique de ce système CSCP. Il est organisé comme suit :

- Premièrement, nous introduisons le concept du solaire thermique et une brève description de la technologie des concentrateurs solaires.
 - Puis nous présentons le principe de fonctionnement de CSCP et pose le problème de commande
- Finalement, nous terminerons par la modélisation de notre système en se basant sur les lois de la thermodynamique et le bilan énergétique.

Dans Le troisième chapitre nous avons étudié le problème de commande d'une classe des systèmes régis par EDP a fin de Controller la température de sortie du tube-récepteur du CSCP.

On a présente Pratiquement la séquence de commande à appliquer aux procédés industriels n'est plus libre, de ce fait le problème d'optimisation sera reformuler de nouveau et résolu par une méthode de programmation NMPC

Et dans le dernier chapitre nous fait la simulation de notre programme et désignée les résultats obtenue

Nous espérons comme Perspectives la mise en œuvre 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

Il faut noter aussi que certains de ces points sont déjà en cours d'exploration. Des résultats très encourageants ont été constatés et d'autres sont attendus incessamment

BIBLIOGRAPHIE

1 KALOGIROU, Soteris. Solar energy engineering : processes and systems. 1st ed. USA : Elsevier, 2009. 756 p. ISBN 978-0-12-374501-9.

2 De CAUS, S. Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes, auxquelles sont adjoints plusieurs dessins de grottes & fontaine. J. Norton, Francfort, reprod. CNAM F Da 1. Paris. 1615. ISBN

3 DE BUFFON, L. C. Invention de miroirs ardents, pour bruler à une grande distance. Registres de l'Académie Royale des Sciences / CNRS-CRHST, 1747. ISBN

4 Centre de développement des énergies renouvelables en Algérie. [en ligne]. Consulté en 2018. Disponible sur <www.cder.dz>.

5 COULAUD, Céline. Feuille de route : Solaire thermodynamique. Paris : ADEME, Février 2011. 36 p. ISBN : 978-2-35838-195-6.

6 Energies, Solaire par ivan todoroff le 11 janvier 2018

7 Centre de développement des énergies renouvelables en Algérie : Bulletin 22. Alger : CDER. EISSN/ISSN 1112-3850. 40 p.

8 SYLVAIN, Quoilin. Rapport sur les centrales solaires à concentration. Université de Liège, Mai 2007. 34 p

9 Installation instruction and guidance related to transport, handling, maintenance and disposal, 3rd generation : Receiver Manual SCHOTT PTR®70. Germany : SCHOTT Solar, 2012. 58 p.

10 L. Zadeh, B. Whalen, On optimal control and linear programming, IRE Transactions on Automatic Control 7 (4) (1962) 45–46.

11 P. J. Gawthrop, Continuous-time self-tuning control : Implementation, John Wiley & Sons, Inc.,1990

12 J. Testud, J. Richalet, A. Rault, J. Papon, Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes, Automatica 14 (5) (1978) 413–428.

13 M. Alamir, F. Allgöwer, Proceedings of the first ifac workshop on nonlinear model predictive control for fast systems nmpc-fs'06.

14 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

15 H. M. . D. Q. Mayne, Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems, Vol. 38, IEEE, 1993.

16 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.

17 V. Zavala, C. Laird, L. Biegler, Fast solvers and rigorous models : Can both be accomodated in nmpc , in : IFAC Workshop on Nonlinear Model Predictive

18 E. F. Camacho and C. Bordons. Model Predictive Control in the Process Industry. Second Edition. Springer-Verlag, London, England, 2004.

19 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.

20 D. Limon - I. Alvarado , T. Alamo , M. Ruiz , E. F. Camacho Robust control of the distributed solar collector field ACUREX using MPC for tracking ,Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008