

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



Département d'Automatique  
Laboratoire de Commande des Processus

***Thèse de Doctorat En Automatique***  
Option : Automatique des systèmes de conversion d'énergie

*Intitulée*

**Contribution à la Commande Hybride à Base de  
la Commande CDM, Étude et Application**

Présenté par : Zakaria FENCHOUCHE

Ingénieur Master en Automatique de l'ENP

Présentée et soutenue par visio-conférence le (21/01/2021)

**Composition du jury**

Président	M. Mohand Ouldhadj MAHMOUDI	Professeur, ENP
Directeur	M. Mohamed Seghir BOUCHERIT	Professeur, ENP
CO-directeur	M. Omar BENZINEB	Professeur, USDB
Examineur	M. Mohamed TADJINE	Professeur, ENP
Examineur	M. Djamel BOUDANA	Professeur, ENP
Examineur	M. Said GROUNI	Professeur, UMBB

ENP 2021



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



Département d'Automatique  
Laboratoire de Commande des Processus

*Thèse de Doctorat En Automatique*  
Option : Automatique des systèmes de conversion d'énergie

*Intitulée*

**Contribution à la Commande Hybride à Base de  
la Commande CDM, Étude et Application**

Présenté par : Zakaria FENCHOUCHE

Ingénieur Master en Automatique de l'ENP

Présentée et soutenue par visio-conférence le (21/01/2021)

**Composition du jury**

Président	M. Mohand Ouldhadj MAHMOUDI	Professeur, ENP
Directeur	M. Mohamed Seghir BOUCHERIT	Professeur, ENP
CO-directeur	M. Omar BENZINEB	Professeur, USDB
Examineur	M. Mohamed TADJINE	Professeur, ENP
Examineur	M. Djamel BOUDANA	Professeur, ENP
Examineur	M. Said GROUNI	Professeur, UMBB

ENP 2021

## ملخص:

زيادة الحاجة الى الطاقة الكهربائية في العالم، الآثار الجانبية للطاقت البترولية وخطر انتهائها، كل هذه الظروف تحتم علينا التوجه نحو استغلال الطاقات النظيفة والمتجددة التي تمثل الطاقة الكهربائية جزءا كبيرا منها وأكثر تحديدا نركز الاهتمام على الطاقة الشمسية الحرارية. في هذه المذكرة، نقترح دراسة ومراقبة محطة شمسية معتمدة على المستقبلات الاشعاعية الاسطوانية المقعرة والتي لها مردودات هامة مقارنة مع المحطات الحرارية المعروفة الأخرى. إلا أن التحكم في مثل هذه الأنظمة صعب نوعا ما بسبب استقلالية مصدر الطاقة والذي هو الإشعاعات الشمسية وأيضا بسبب تغيرات المعاملات. فهذا يستلزم تطبيق قواعد تحكم دقيقة ومتطورة على الأنظمة الغير خطية والمبهمه.

وهنا نقترح نظام تحكم اسمه طريقة مخطط المعاملات، هي نهج جديد مستعمل في التحكم في الأنظمة الغير خطية في المجال التطبيقي لتعويض المراقب التقليدي PID، باستعمال CDM وفي نقطة عمل، يمكننا الحصول على تصور لمنظم مستقر وفي نفس الوقت متين، بدون تجاوز للمرجع ومع وقت صعود محدد. إضافة إلى هذا، يمكننا تحسين أداء التحكم بإضافة مراقب ضبابي للتبديل بين مجموعة من المراقبات CDM ليكون بذلك تحكما هجيناً، يغطي جميع نقاط العمل.

**كلمات مفتاحية:** طريقة مخطط المعاملات، مستقبل اشعاعي أسطواني مقعر، التحكم الهجين، مراقب التبديل، المنطق الضبابي.

## Abstract :

The increase in the need for electric energy and other conditions imply the orientation towards the exploitation of clean and renewable energy sources, such as solar energy, and more precisely we are interested in solar thermal. In this thesis, we propose to study and control a solar power plant based on cylindrical-parabolic collectors which gives high yields by comparing with other known thermal power plants. However, it is a little difficult to control such systems because of its dependence on solar irradiation variations, and because of parametric variations. It requires the application of precise and developed controls to apply on uncertain nonlinear systems.

Hence, we propose a control called coefficient diagram method, it is a new approach, used to control non-linear systems in practice to replace the conventional PID control. In an operating point, the CDM can give a design of a regulator that is both stable, robust, without reference overshoot and with a specified rise time. Also, to guarantee good performances in all operating points, the control can be improved by adding a supervisory switching of CDM controllers using the fuzzy logic, as a hybrid control.

**Key words :** Coefficient diagram method, collector cylindrical-parabolic, hybrid control, supervisory switching, Fuzzy logic

## Résumé :

L'augmentation du besoin en énergie électrique dans le monde avec d'autres conditions, impliquent l'orientation vers l'exploitation des sources d'énergies propres et renouvelables telles que l'énergie solaire, nous nous intéressons plus précisément aux systèmes solaires thermiques. Dans cette thèse, on se propose d'étudier et commander une centrale solaire faite de collecteurs cylindro-paraboliques qui donnent des rendements importants par rapport aux autres centrales thermiques connus. Cependant, il est relativement difficile de commander de tels systèmes à cause de leur dépendance des variations des irradiations solaires, et à cause des variations paramétriques. Ceci nécessite l'application des techniques de commande précises développées pour les systèmes non linéaires incertains.

On propose d'implémenter une commande appelée Méthode du Diagramme des Coefficients ; c'est une nouvelle approche utilisée en pratique pour les systèmes non linéaires en remplacement des PID traditionnels. Dans un domaine de fonctionnement, le CDM peut donner un régulateur à la fois stable, robuste, sans dépassement de référence et avec un temps de montée spécifié. Ensuite, pour garantir des bonnes performances dans toutes les points de fonctionnement, on construit un système de commande hybride à base de la logique floue, avec un superviseur de commutation entre plusieurs contrôleurs CDM.

**Mots clés :** Méthode du Diagramme de Coefficients, Capteur Cylindro-parabolique, Commande Hybride, Logique floue, superviseur de commutation

---

# Remerciements

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse a été effectué au Laboratoire de Commande de Processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de Monsieur le professeur **Mohamed Seghir Boucherit** et Monsieur le professeur **Omar Benzineb**. Je tiens à les remercier pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en acceptant de diriger ce travail. Leur disponibilité et leurs encouragements durant de longues années m'ont été d'un grand apport pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Mohand Ouldhadj Mahmoudi**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Que Monsieur **Mohamed Tadjine**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Que Monsieur **Djamel Boudana**, Maître de Conférences A à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Que Monsieur **Said Grouni**, Professeur à l'université de Boumerdes, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je tiens à remercier vivement Monsieur le professeur **Mohamed Tadjine**, et Monsieur le professeur **Chakir Messaoud** pour leurs contributions intellectuelles dans cette thèse qui ont été un facteur prépondérant de sa réussite, je les remercie pour leurs aides, leurs disponibilités, et leurs patiences .

Je souhaite aussi remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et en particulier, mes professeurs d'automatique qui m'ont encadrés auparavant et tous mes enseignants pour les connaissances qu'ils m'ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Enfin, je ne pourrais terminer cet avant-propos sans remercier toute ma famille pour son soutien pendant toutes mes études et particulièrement mes parents.

# TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations et Nomenclatures

<b>Introduction Générale</b>	<b>12</b>
<b>1 Méthode du diagramme de coefficients</b>	<b>16</b>
1.1 Introduction . . . . .	17
1.2 Rappel sur la commande CDM . . . . .	17
1.2.1 Polynôme caractéristique . . . . .	18
1.2.2 Relations mathématiques . . . . .	18
1.2.3 Condition de stabilité . . . . .	19
1.2.4 Indice de stabilité et forme standard de Manabe . . . . .	19
1.2.5 Diagramme de coefficients . . . . .	19
1.3 Synthèse du régulateur à base de la méthode CDM . . . . .	20
1.3.1 Choix du degré du polynôme caractéristique . . . . .	22
1.3.2 Équation de Diophantine . . . . .	22
1.4 Conclusion . . . . .	23
<b>2 Description et modélisation d'une station solaire thermique</b>	<b>26</b>
2.1 Introduction . . . . .	27
2.2 Les systèmes solaires thermiques . . . . .	27
2.2.1 Principe de fonctionnement . . . . .	27
2.2.2 Étapes de production d'électricité . . . . .	28
2.2.3 Fluides calo-porteurs . . . . .	28
2.2.4 Stockage thermique . . . . .	29
2.2.4.1 En fabricant de l'hydrogène . . . . .	29
2.2.4.2 Dans du sel fondu . . . . .	30

---

2.2.5	Collecteurs solaires . . . . .	30
2.3	Types des stations solaires thermiques . . . . .	31
2.3.1	Centrale à tour . . . . .	32
2.3.2	Centrale à effet de cheminée . . . . .	32
2.3.3	Centrale à concentrateurs paraboliques . . . . .	33
2.3.4	Centrale à réflecteur de Fresnel . . . . .	33
2.3.5	Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques . . . . .	34
2.4	Approches de modélisation et de simulation des systèmes solaires thermiques . . . . .	35
2.4.1	Modèle fondamentale . . . . .	35
2.4.2	Modèle à paramètres regroupés . . . . .	36
2.4.3	Modèle bilinéaire . . . . .	36
2.4.4	Modèle de résonance . . . . .	37
2.4.5	Modèle empirique . . . . .	37
	2.4.5.1 Modèle linéaire . . . . .	37
	2.4.5.2 Modèle non linéaire . . . . .	38
2.5	Modélisation mathématique du système . . . . .	38
2.6	Commande à base du régulateur PID . . . . .	41
2.7	Conclusion . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Commande de la station solaire à base du CDM</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	49
3.2	Point de fonctionnement et modèle de contrôle . . . . .	49
3.3	Schéma de contrôle . . . . .	51
3.4	Modèle réduit . . . . .	51
3.5	Résultats et simulations . . . . .	53
	3.5.1 Critères de performances . . . . .	54
3.6	Tests de robustesses . . . . .	58
3.7	Conclusion . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Commande hybride à base du CDM</b>	<b>63</b>
4.1	Introduction . . . . .	64
4.2	Superviseur flou de commutation entre des contrôleurs CDM . . . . .	64
4.3	Méthodologie de commande . . . . .	64
	4.3.1 Fuzzification . . . . .	65
	4.3.2 Moteur d'inférence . . . . .	66
	4.3.3 Agrégation des règles . . . . .	67
4.4	Synthèse du contrôleurs CDM . . . . .	68
	4.4.1 Fonction de regroupement : <i>c-Means Clustering</i> . . . . .	68
4.5	Résultats de simulation . . . . .	69
4.6	Conclusion . . . . .	70
	<b>Conclusion générale</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>78</b>

---

<b>Annexes</b>	<b>79</b>
<b>A Matrices du système</b>	<b>79</b>
<b>B Liste des publications de l'auteur</b>	<b>81</b>

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Différents choix des paramètres de $A(s)$ et $B(s)$ pour les différents types de perturbations . . . . .	22
2.1	Description des paramètres . . . . .	39
3.1	Performances du régulateur CDM et régulateur PID appliqués à la centrale solaire . . . . .	56
3.2	Performances des régulateurs CDM et /PID à la centrale solaire . . . . .	57

## TABLE DES FIGURES

1.1	Schéma bloc de la commande CDM . . . . .	17
1.2	Effets de $(\gamma_i)$ (A) et de $(\tau)$ (B) sur le diagramme de coefficients . . . . .	20
1.3	Digramme de coefficients . . . . .	20
2.1	Distribution de l'énergie solaire dans le monde. . . . .	27
2.2	Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique . . . . .	28
2.3	Cycle d'échauffement-refroidissement du fluide calo-porteur . . . . .	29
2.4	Deux Réservoirs de stockage thermique . . . . .	30
2.5	Comparaison des technologies solaires à concentration . . . . .	31
2.6	Types des centrales solaires . . . . .	31
2.7	Centrale à tour, Gémasolar en Espagne . . . . .	32
2.8	Centrale à effet de cheminée . . . . .	33
2.9	Centrale aux concentrateurs paraboliques . . . . .	33
2.10	Centrale à réflecteur de Fresnel . . . . .	34
2.11	Capteur Cylindro-parabolique . . . . .	34
2.12	Diagramme du collecteur montrant les paramètres et la discrétisation spatiale . . . . .	39
2.13	Température d'entrée . . . . .	42
2.14	Température ambiante . . . . .	42
2.15	Irradiations solaires . . . . .	42
2.16	Structure du régulateur PID . . . . .	43
2.17	Schéma de commande par un régulateur PID . . . . .	43
2.18	Fonction "PID Tuner" dans Simulink . . . . .	44
2.19	Réponse du système $t_{s1}$ . . . . .	45
2.20	Signal de commande $t_{s1}$ . . . . .	45
2.21	Réponse du système avec $t_{s2}$ . . . . .	45
2.22	Signale de commande avec $t_{s2}$ . . . . .	45
3.1	Digramme en bloc de la commande CDM appliquée sur le système non-linéaire . . . . .	51

---

3.2	Comparaison entre le diagramme de Bode du modèle $G(s)$ (en vert) et le modèle approximée de seconde ordre $G_r(s)$ (en bleu) . . . . .	52
3.3	Température d'entrée . . . . .	53
3.4	Température ambiante . . . . .	53
3.5	Irradiations solaires . . . . .	54
3.6	Schéma de commande par un régulateur CDM . . . . .	54
3.7	Réponse échelon . . . . .	55
3.8	Débit de fluide . . . . .	55
3.9	Zoom sur la figure des signaux de commande avec les irradiations . . .	56
3.10	Réponse avec des variations de consigne . . . . .	57
3.11	Température de sortie, d'entrée et des segments du fluide en 2-D avec le débit . . . . .	58
3.12	Dynamique interne montre la distribution de la température en 3D . .	58
3.13	Test de robustesse pour la variation de la densité du fluide . . . . .	59
3.14	Test de robustesse pour la variation de la capacité calorifique . . . . .	60
4.1	Schéma de commande par le superviseur flou de commutation entre les contrôleurs de CDM . . . . .	65
4.2	Fonction d'appartenance des irradiations solaires . . . . .	66
4.3	Fonction d'appartenance de la température de référence . . . . .	66
4.4	Base de règle du superviseur de commutation . . . . .	67
4.5	Base de règles simplifiée du superviseur de commutation . . . . .	68
4.6	Regroupement des contrôleurs CDM ( <b>o</b> = contrôleurs initiaux, * = contrôleurs finals) . . . . .	69
4.7	Réponse du système commandé avec un seul contrôleur . . . . .	70
4.8	Réponse du système commandé par la commande hybride . . . . .	70

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET NOMENCLATURE

### Abréviations

PDE	Équation aux dérivées partielles
HTF	Transfert de chaleur du fluide
NL	Non linéaire (Système)
PI	Proportionnel intégral (contrôleur)
PID	Proportionnel intégral dérivée (contrôleur)
LQG	Linéaire quadratique gaussien (contrôleur)
CDM	Méthode du diagramme de coefficients
CSCP	Concentrateurs solaire cylindro-parabolique
RMPCT	Technologie de contrôle prédictive robuste multivariable
S.H.C	Capacité thermique spécifique
C.H.T.C	Coefficient de transfert de chaleur par convection

# Nomenclature

paramètre	Description
$t$	Temps [s]
$l$	Longueur [m]
$\rho$	Densité [ $kg/m^3$ ]
$C_f$	Capacité thermique spécifique du fluide [ $J/(kgK)$ ]
$A$	Section transversale [ $m^2$ ]
$T(l, t)$	Température [K]
$q(t)$	Débit du fluide [ $m^3/s$ ]
$I(t)$	Rayonnement solaire [ $W/m^2$ ]
$\eta_0$	Efficacité géométrique
$K_{opt}$	Efficacité optique
$G$	Ouverture du collecteur [m]
$T_a(t)$	Température ambiante [K]
$H_l$	Coefficient global des pertes thermique [ $W/(Km^2)$ ]
$H_t$	Coefficient de transmission thermique de métal-fluide [ $W/(Km^2)$ ]
$\delta_p$	périmètre mouillé [m]
$C$	Facteur de concentration
$\xi$	Erreur de discrétisation
$y_r$	Consigne

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Il est bien connu que même avec le développement des techniques de commande automatique, le PID reste un contrôleur très important dans l'industrie avec un pourcentage de 95% des régulateurs utilisés dans la pratique. Cependant, plusieurs contraintes sont imposées dans les applications pratiques comme noté par certains chercheurs [1], telle que la limite supérieure de magnitude du signal de commande, les effets non-linéaires inattendus produits par la saturation ou autres. Pour cette raison, il est nécessaire de développer une commande robuste pour obtenir des meilleures performances avec des systèmes instables à double intégration, dont la stabilité n'est pas assurée par le régulateur PID (développé pour les systèmes stables). [2]

Une nouvelle approche algébrique a prouvé sa robustesse dans plusieurs travaux. C'est une nouvelle commande robuste dite " Méthode du diagramme de coefficients (CDM)", développée pour les systèmes incertains et introduite par plusieurs chercheurs comme Manabe [3, 4]. Il est important de noter que dans notre travail on n'est pas intéressé par les commandes avancées appliquées dans certains travaux de recherche, mais par les méthodes utilisées dans la pratique et dans les systèmes industriels comme le PID et le LQG ...

La commande CDM est basée sur un diagramme spatial dit diagramme de coefficients, qui est utilisé comme un véhicule pour porter les informations nécessaires de la conception et comme un critère de bonne conception. La méthode est très utilisée ces derniers temps à cause de la simplicité et de la robustesse du contrôleur qui peut être calculé pour n'importe quelle système sous les limitations pratiques, en plus ; cette simplicité le rend très puissant pour les systèmes avec plusieurs incertitudes [5]. En d'autres termes, Le CDM peut donner une conception d'un régulateur qui est à la fois stable, robuste et qui assure la vitesse de réponse désirée, aussi, il est moins sensible aux perturbations et aux variations paramétriques, sans dépassement de référence et avec un temps de montée spécifié [6].

En plus de l'application de la commande CDM, on apporte une autre contribution en l'appliquant sur un système intéressant, et en introduisant une amélioration dans la partie modélisation et commande, ça concerne un système énergétique.

Dans notre vie, l'énergie fossile reste la source de production d'électricité principale dans le monde entier, mais elle risque de disparaître dans les années à venir, comme elle a d'autres inconvénients tels que, les émissions de CO<sub>2</sub>, et la dépendance

---

de l'économie de l'état de cette matière.

Pour cela, on veut construire une économie basée non seulement sur les hydrocarbures, mais aussi sur les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire.

Au cours de la dernière décennie, l'énergie solaire a reçu de plus en plus d'attention afin de répondre à la croissance exponentielle de la demande énergétique. Plusieurs systèmes solaires électriques ont été développés, tels que le solaire thermique concentré, et plus précisément les collecteurs creux cylindro-paraboliques, qui constituent la technologie la plus utilisée pour la concentration d'énergie solaire. Aujourd'hui, certaines centrales solaires sont en construction, tandis que d'autres sont déjà en fonctionnement tel que la Plateforme solaire d'Almeria ( ACUREX ). [7, 8]

Le problème principale de l'énergie solaire est sa dépendance des variations des irradiances solaires, en plus du fait qu'elle ne peut pas être ajustée pour répondre aux demandes désirées ; par exemple : la couverture nuageuse, l'humidité et la transparence de l'air sont des conditions atmosphériques qui peuvent affecter le rayonnement solaire par des variations imprévisibles.[9]

Du point de vue de la recherche, de nombreux travaux ont été proposés pour modéliser, contrôler ou bien observer les systèmes thermos solaires. Plusieurs auteurs ont testé différents modèles du système solaire avec différents niveaux de complexité et précision, comme le bilinéaire réduit ou le système distribué non linéaire. [8, 10, 11]

D'un autre coté, plusieurs stratégies de commande ont été implémentées pour ramener le système à fonctionner autour d'un point de fonctionnement nominal. On cite des testes bien connus, effectués à la centrale ACUREX : avec un contrôleur PID à auto-ajustement [9], la logique floue [12], commande prédictive (RMPCT)... ect ; ainsi que d'autres stratégies de commande basées sur les prédicteurs pour estimer les variables comme les irradiances solaires effectives ou les températures du système. [13]

Dans ce travail, nous avons essayé d'appliquer l'approche algébrique CDM sur la station solaire thermique à base de collecteurs cylindro-paraboliques, en intégrant d'autres commande en hybridant avec le CDM pour améliorer la réponse du système.

Dans le premier chapitre, on présente un rappel sur la méthode du diagramme de coefficients, en montrant les étapes de synthèse du régulateur avec les paramètres importants, un exemple d'une fonction de transfert est donné pour montrer les étapes et pour utiliser l'outil d'analyse des performances qui est le diagramme de coefficients, où on représente graphiquement les paramètres précédents.

Le deuxième chapitre portera sur la description du principe solaire thermique, avec les différents types de stations existantes dans l'industrie, puis nous nous focalisons sur les stations solaires basées sur des collecteurs cylindro-paraboliques, que nous représentons par un modèle de connaissance issu d'équations aux dérivées partielles, et par un autre modèle dans l'espace d'état de manière à prendre les incertitudes paramétriques en considération.

Dans le troisième chapitre, on entame la partie commande, en appliquant la méthode CDM pour synthétiser un régulateur pour la station solaire thermique, ça nécessite d'abord de linéariser le système autour d'un point de fonctionnement. Des tests de simulations sont effectués pour évaluer les performance de cette nouvelle approche sur le système solaire, en comparant les performances avec celles du PID

---

traditionnel, d'autres tests sont effectués en variant les paramètres du système pour évaluer la robustesse de la commande.

Dans le quatrième chapitre, on propose une commande basée sur la logique floue, en développant un superviseur flou pour commuter entre des contrôleurs CDM synthétisés pour plusieurs points de fonctionnement, car un seul régulateur ne peut pas assurer des bonnes performances que dans un seul domaine de fonctionnement, la combinaison entre la commande CDM et la logique floue forme une commande hybride à appliquer à la station solaire thermique.

# Chapitre I

---

**Méthode du diagramme  
de coefficients**

# CHAPITRE 1

## MÉTHODE DU DIAGRAMME DE COEFFICIENTS

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Les systèmes solaires thermiques</b> . . . . .	<b>26</b>
2.2.1	Principe de fonctionnement . . . . .	26
2.2.2	Étapes de production d'électricité . . . . .	27
2.2.3	Fluides calo-porteurs . . . . .	27
2.2.4	Stockage thermique . . . . .	28
2.2.5	Collecteurs solaires . . . . .	29
<b>2.3</b>	<b>Types des stations solaires thermiques</b> . . . . .	<b>30</b>
2.3.1	Centrale à tour . . . . .	30
2.3.2	Centrale à effet de cheminée . . . . .	31
2.3.3	Centrale à concentrateurs paraboliques . . . . .	31
2.3.4	Centrale à réflecteur de Fresnel . . . . .	32
2.3.5	Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques . . . . .	32
<b>2.4</b>	<b>Approches de modélisation et de simulation des systèmes solaires thermiques</b> . . . . .	<b>33</b>
2.4.1	Modèle fondamentale . . . . .	33
2.4.2	Modèle à paramètres regroupés . . . . .	34
2.4.3	Modèle bilinéaire . . . . .	34
2.4.4	Modèle de résonance . . . . .	36
2.4.5	Modèle empirique . . . . .	36
<b>2.5</b>	<b>Modélisation mathématique du système</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>2.6</b>	<b>Commande à base du régulateur PID</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>44</b>

---

---

## 1.1 Introduction

La raison principale pour laquelle la plupart des industries de contrôle préfèrent encore les contrôleurs classiques tels que P, PI et PID, est qu'ils sont simples et intuitifs. De plus, les théories de commandes optimales avancées et robustes ne peuvent pas effectivement être conformes avec les contrôleurs d'ordre fixe. Donc, on a encore besoin d'utiliser les lois de Ziegler Nichols. Récemment, une nouvelle méthode appelée "méthode du diagramme de coefficients (CDM)" a été développée, c'est une approche algébrique utilisée pour synthétiser des régulateurs robustes pour les systèmes non linéaires et incertains [14]. L'application de cette commande sur différents systèmes a donné des bons résultats, tels que les missiles guidés [15] et les robots manipulateurs [16] et autres.

## 1.2 Rappel sur la commande CDM

La commande CDM est une méthode nouvelle et robuste, c'est une approche algébrique développée pour les systèmes non-linéaires incertains. L'approche algébrique se situe entre la commande classique (comme le PID) et la commande moderne (tel que le mode glissant), c'est la troisième théorie de contrôle, appelée aussi l'approche polynomiale. La représentation polynomiale est facile à comprendre comme la fonction de transfert, et précise comme la représentation dans l'espace d'état, c'est l'avantage de l'approche algébrique contre la commande classique et la commande moderne. La méthode CDM est basée sur un diagramme spatial appelé diagramme de coefficients et sur la résolution de l'équation de Diophantine.

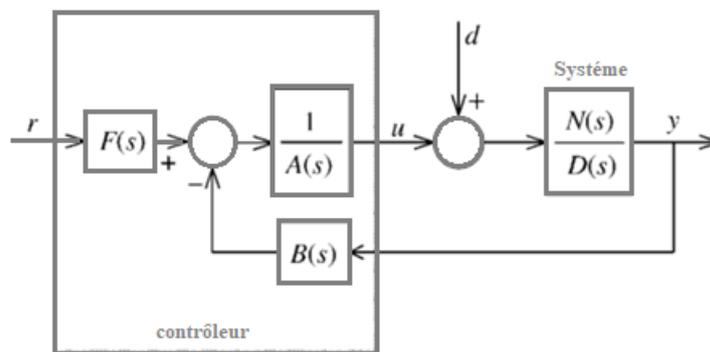


Figure 1.1: Schéma bloc de la commande CDM

Le schéma de la commande CDM est composé de trois blocs (Fig. 1.1),  $A(s)$  polynôme de dénominateur en avance,  $F(s)$  et  $B(s)$  les polynômes des numérateurs, le premier c'est pour la référence et les deux autres pour le retour, où  $r$  étant la référence et  $d$  les bruits. Les polynômes dans cette structure sont déterminés pour avoir des meilleurs performances en termes de poursuite de la référence désirée et de rejet des perturbations, la structure permet aussi à éviter l'annulation des pôles-zéros instables.

Pour la synthèse du contrôleur, on doit avoir une fonction de transfert, soit  $G(s)$  formée par le numérateur  $N(s)$  et le dénominateur  $D(s)$ .

### 1.2.1 Polynôme caractéristique

La sortie en boucle fermée du système de la Fig. 1.1 est comme suit :

$$y = \frac{N(s)F(s)}{P(s)}r + \frac{A(s)N(s)}{P(s)}d \quad (1.1)$$

tel que  $P(s)$  est le polynôme caractéristique de la boucle fermée qui s'écrit :

$$P(s) = D(s)A(s) + N(s)B(s) \quad (1.2)$$

Avec :

$$P(s) = a_n s + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (1.3)$$

Pour faire le schéma du contrôleur CDM, on doit aussi savoir trois paramètres dont le schéma est basé, la constante de temps équivalente ( $\tau$ ), l'indice de stabilité ( $\gamma_i$ ) et les limites de stabilité ( $\gamma_i^*$ ), ils sont définis en fonction des coefficients des polynômes caractéristiques :

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}}, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (1.4)$$

$$\gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad (1.5)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (1.6)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}} \quad (1.7)$$

### 1.2.2 Relations mathématiques

En utilisant les relations entre les paramètres et les coefficients, le polynôme caractéristique  $P(s)$  (appelé aussi polynôme caractéristique cible) peut être formulé en terme de  $(a_0)$ ,  $(\tau)$  et  $(\gamma_i)$  comme suit :

$$P(s) = a_0 \left[ \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^i} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (1.8)$$

La constante de temps équivalente de l'ordre  $i$  ( $\tau_i$ ) est défini comme suit :

$$\tau_i = \frac{a_{i+1}}{a_i} \quad (1.9)$$

Ensuite, les relations suivantes sont déduites :

$$\tau_i = \frac{\tau_{i-1}}{\gamma_i} = \frac{\tau}{\gamma_i \cdot \gamma_{i-1} \dots \gamma_2 \cdot \gamma_1} \quad (1.10)$$

---


$$a_i = \tau_{i-1} \cdot \tau_{i-2} \cdot \tau_2 \cdot \tau_1 \cdot \tau \cdot a_0 = \frac{a_0 \tau^i}{\gamma_{i-1} \cdot \gamma_{i-2}^2 \cdots \gamma_2^{i-2} \cdot \gamma_{i-1}} \quad (1.11)$$

Noter bien qu'on peut donner l'expression de la fonction de la constante de temps équivalente en fonction du temps de réponse  $t_s$  comme suit :

$$\tau = \alpha \cdot t_s \quad \alpha \in [0.33 \ 0.4] \quad (1.12)$$

### 1.2.3 Condition de stabilité

Les conditions de stabilité approprié à la CDM sont basées sur les conditions de Lipatov comme montré dans [17] par le théorème suivant : "Le système est stable si tous les polynômes partiels du quatrième ordre du polynôme caractéristiques sont stables avec une marge de 1.12. Le système est instable si certains polynômes partielles du troisième ordre sont instables"

Donc, La condition suffisante pour la stabilité est donnée comme suit :

$$\gamma_i > 1.12 \gamma_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, (n - 2) \quad (1.13)$$

Et la condition suffisante pour l'instabilité est donné par :

$$(\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1) \text{ pour quelque } i = 1, 2, \dots, (n - 2) \quad (1.14)$$

### 1.2.4 Indice de stabilité et forme standard de Manabe

L'indice de stabilité est une mesure importante pour montrer la stabilité du système. Il est connu depuis longtemps par différents noms, comme le facteur d'amortissement ( Kessler 1960), le rapport caractéristique (Naslin 1968) et le rapport double (Brandenburg 1996), mais ces noms ne peuvent pas représenter correctement la nature du terme ou bien ils sont utilisés dans d'autres sens. Pour cette raison, le nouveau nom *indice de stabilité* est donné, en recommandant des valeurs standards comme suit :

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (1.15)$$

Cette forme est dite *la forme standard de Manabe*, la raison pour laquelle on prend ces valeurs recommandées c'est la clé de la méthode CDM. La constante de temps équivalente  $\tau$  est la mesure de la vitesse de réponse, pour les valeurs standards recommandé de  $\gamma_i$ , la durée de toutes les réponses transitoires soit entre 2.5 et 3 de  $\tau$ . Donc, la synthèse du régulateur CDM est basée sur *l'indice de stabilité* et *la constante de temps équivalente*.

### 1.2.5 Diagramme de coefficients

Le diagrammes de coefficients de la Fig. 1.3 est donné par Manabe [3] pour un polynôme caractéristique  $P(s)$  connu. les coefficients  $a_i$  se lisent sur l'échelle du coté

droit, les indices de stabilité  $\gamma_i$  peuvent être trouvés graphiquement (Fig. 1.2 A ), le système est plus stable pour une large courbure des  $a_i$ , ça correspond aux valeurs des  $\gamma_i$  les plus grandes.

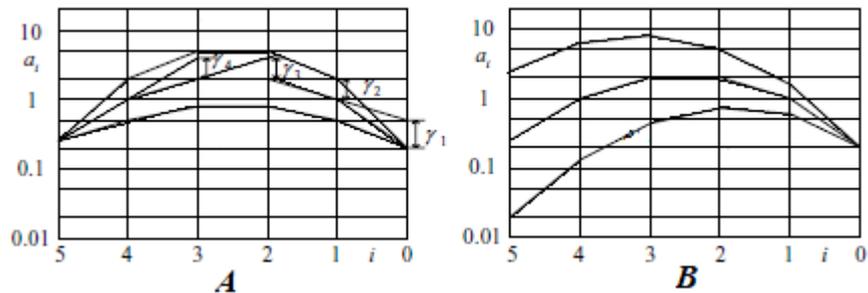


Figure 1.2: Effets de ( $\gamma_i$ ) (A) et de ( $\tau$ ) (B) sur le diagramme de coefficients

Ensuite, la constante de temps équivalente  $\tau$  est petite avec une réponse plus rapide quand l'extrémité gauche de la courbe des  $a_i$  descend vers le bas (Fig. 1.2 B ).

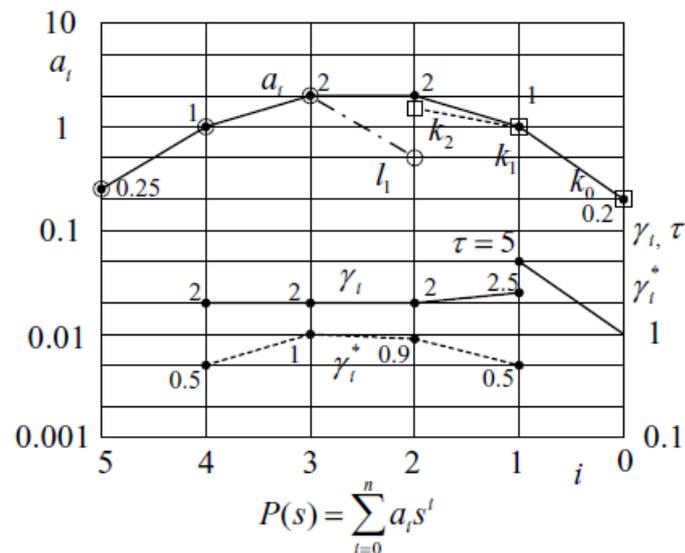


Figure 1.3: Diagramme de coefficients

### 1.3 Synthèse du régulateur à base de la méthode CDM

La synthèse du régulateur à base de CDM se fait dans le sens inverse, en commençant avec les indices de stabilité, puis, en proposant le polynôme cible et avec l'équation de Sylvester on conclut les polynômes du contrôleur.

Plusieurs auteurs ont recommandé l'utilisation de la forme standard de Manabe [4] pour la synthèse du régulateur CDM (il les a choisi après quelques études) [4], les indices de stabilité comme vu précédemment sont :

$$\gamma_i = \{2.5, 2, 2, \dots, 2\} \text{ pour } i = \sim (n - 1) \quad (1.16)$$

La procédure pour synthétiser le contrôleur CDM est donnée par plusieurs auteurs [18–20]; suivons cette procédure pas à pas et appliquons la méthode sur notre système.

Commençons par traiter un exemple simple de la fonction de transfert  $G(s)$  suivante :

$$G(s) \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{d_n s^n + d_{n-1} s^{n-1} + \dots + d_1 s + d_0} = \frac{1}{0.25s^4 + s^3 + 2s^2 + 0.5s} \quad (1.17)$$

Où  $N(s)$  est le polynôme du numérateur de degré  $m$  et  $D(s)$  le polynôme du dénominateur de degré  $n$ , avec  $m \leq n$ .

On prend un degré du polynôme caractéristique  $P(s)$  égale à 5, (on cite à 1.3.1 un des critères pour le choix des degrés du polynôme cible et les autres polynômes des contrôleurs). Ainsi, le polynôme cible  $P(s)$  s'écrit comme suit : [3]

$$P(s) = a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (1.18)$$

Posant  $a_0 = 0.2$  et  $\tau = 5$  et prenant la forme standard de Manabe, donc :

$$\gamma_i = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4\} = \{2.5, 2, 2, 2\} \quad (1.19)$$

Les limites de stabilité se calculent en utilisant la relation 1.7 :

$$\gamma_i^* = \{\gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^*, \gamma_4^*\} = \{0.5, 1, 0.9, 0.5\} \quad (1.20)$$

En utilisant la relation 1.6, on tire  $a_1$ , soit :

$$a_1 = a_0 \cdot \tau = 0.2 \times 5 = 1 \quad (1.21)$$

Ensuite, les autres coefficients seront calculés en utilisant la relation 1.4, avec :

$$a_{i+1} = \frac{a_i^2}{a_{i-1} \gamma_i}, \quad i = 1, \dots, n - 1 \quad (1.22)$$

Donc :

$$a_i = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} = \{0.2, 1, 2, 2, 1, 0.5\} \quad (1.23)$$

Finalement le polynôme caractéristique  $P(s)$  est donné par :

$$P(s) = 0.5s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2 \quad (1.24)$$

La structure du contrôleur représentée sur la Fig. 1.1 est basée sur deux polynômes nommés  $A(s)$  et  $B(s)$  dont les expressions sont :

$$A(s) = \sum_{i=0}^p l_i s^i \quad B(s) = \sum_{i=0}^q k_i s^i \quad (1.25)$$

Les expressions de ces polynômes avec leurs coefficients sont considérés comme suit :

$$A(s) = l_1 s = s \quad (1.26)$$

$$B(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0 = 0.2s^2 + s + 1.5 \quad (1.27)$$

Toutes les valeurs calculées précédemment sont représentées dans le diagramme de coefficients à la figure 1.3.

### 1.3.1 Choix du degré du polynôme caractéristique

Plusieurs critères sont considérés pour le choix des degrés des polynômes du contrôleur, on en cite principalement les perturbations, ça sera le critère utilisé dans notre étude pour définir les degrés des polynômes.

Le Tableau 1.1 est donné pour définir les degrés correspondants à différents cas de perturbations, n est le degré du polynôme du dénominateur de la fonction de transfert G(s), le pré-contrôleur défini par le polynôme F(s) est choisi comme suit :

$$F(s) = \left( \frac{P(s)}{N(s)} \right)_{|s=0} \quad (1.28)$$

Tableau 1.1: Différents choix des paramètres de A(s) et B(s) pour les différents types de perturbations

Type de perturbation	deg(P(s))	deg(B(s))	deg(A(s))	condition on (A(s))
aucune	2n - 1	n - 1	n - 1	—
echelon	2n	n	n	$l_0 = 0$
Rampe	2n + 1	n + 1	n + 1	$l_0 = l_1 = 0$
Impulsion & Sinusoïdale	2n - 1	n - 1	n - 1	—

### 1.3.2 Équation de Diophantine

Les coefficients des polynômes du contrôleur sont calculés en utilisant l'équation de Diophantine [21] donnée par :

$$A(s)D(s) + B(s)N(s) = P(s) \quad (1.29)$$

On note que P(s) est déterminé par la substitution des valeurs des paramètres ( $\tau$ ) de ( $\gamma_i$ ) et ( $a_0$ ) dans l'équation (1.8). Les  $\gamma_i, i \sim (n-1)$  sont choisis à partir de la forme de

Manabe [22].  $a_0$  et  $\tau$  sont à remplacer par différentes valeurs jusqu'à ce qu'on trouve la réponse désirée.

$D(s)$  et  $N(s)$  sont donnés à partir de la forme polynomial de la fonction de transfert du système. Il nous reste à trouver les paramètres de  $A(s)$  et  $B(s)$ ,  $l_i$  et  $k_i$  respectivement, en utilisant la relation linéaire des coefficients.

Par exemple, avec  $m = 2$ ,  $n = 3$  et en prenant le modèle dont les perturbations sont de la forme échelon, alors  $\deg(P(s)) = 6$ ,  $\deg(B(s)) = 3$  et  $\deg(A(s)) = 3$  avec  $l_0 = 0$ . on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_2 & d_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ d_1 & d_2 & d_3 & b_1 & b_2 & 0 & 0 \\ d_0 & d_1 & d_2 & b_0 & b_1 & b_2 & 0 \\ 0 & d_0 & d_1 & 0 & b_0 & b_1 & b_2 \\ 0 & 0 & d_0 & 0 & 0 & b_0 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_3 \\ l_2 \\ l_1 \\ k_3 \\ k_2 \\ k_1 \\ k_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_6 \\ a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix} \quad (1.30)$$

Elle est aussi appelée la forme de Sylvester, qui peut être écourtée comme suit :

$$[C]_{7 \times 7} \begin{bmatrix} l_i \\ k_i \end{bmatrix}_{7 \times 1} = [a_i]_{7 \times 1} \quad (1.31)$$

Les paramètres sont facilement calculés en résolvant l'équation linéaire, et  $F(s)$  calculé par l'équation (1.28) :

$$\begin{bmatrix} l_i \\ k_i \end{bmatrix} = [C]^{-1} [a_i] \quad (1.32)$$

Généralement, après l'utilisation de la forme standard de Manabe, aucun ajustement sur les paramètres n'est demandé, sauf pour les systèmes qui nécessitent des commandes précises. Dans ce cas, on peut avoir besoin de faire quelques ajustements après la première conception du régulateur, en changeant les paramètres de synthèse et en répétant le processus jusqu'à ce qu'on trouve la meilleur réponse conforme aux résultats désirés.

Par exemple, si le système est saturé, on peut augmenter  $\tau$  suffisamment et répéter le processus, tandis que la diminution de  $\tau$  peut accélérer la réponse.

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit un rappel sur la méthode du diagramme de coefficients, c'est une méthode algébrique basée sur un diagramme spatial appelé diagramme de coefficients. Les étapes de synthèse du régulateur sont données étape par étape, en commençant avec la forme standard de Manabe, qui a donné des valeurs fixes pour les indices de stabilité correspondant à la meilleure performance et à la meilleure robustesse, il a fait plusieurs tests pour conclure ces valeurs en basant sur les critères de Routh-Huurwitz. Pour nous, il suffit de les utiliser sans refaire l'étude

---

de stabilité. Le schéma de commande de la CDM est composé de trois blocs, la synthèse du régulateur est basée sur la déduction des trois polynômes vus au schéma, soit  $A(s)$ ,  $B(s)$  et  $F(s)$ , en choisissant leurs degrés à base des critères donnés, et leurs paramètres sont déduits en résolvant l'équation de Diophantine.

# Chapitre II

---

**Description et Modélisation  
d'une station solaire  
thermique**

## CHAPITRE 2

# DESCRIPTION ET MODÉLISATION D'UNE STATION SOLAIRE THERMIQUE

### Sommaire

---

3.1	Introduction . . . . .	46
3.2	Point de fonctionnement et modèle de contrôle . . . . .	46
3.3	Schéma de contrôle . . . . .	48
3.4	Modèle réduit . . . . .	49
3.5	Résultats et simulations . . . . .	50
3.5.1	Critères de performances . . . . .	52
3.6	Tests de robustesses . . . . .	56
3.7	Conclusion . . . . .	58

---

## 2.1 Introduction

L' utilisation de l'énergie renouvelable tel que l'énergie solaire a connu une grande impulsion durant la seconde moitié des années soixante-dix ; juste après la première grande crise pétrolière. À ce moment là, les problèmes économiques étaient les facteurs les plus importants, et l'intérêt de ces types de processus diminue lorsque les prix du pétrole ont chuté. Aujourd'hui, Il y a un regain d'intérêt pour l'exploitation des énergies renouvelables, orienté par le besoin de réductions des impacts environnementales élevés produits par l'utilisation des systèmes des énergies fossiles. [23]

Le soleil est la source d'énergie la plus abondante et durable, il fournit à la terre plus de 150,000 terawatts de puissance avec une distribution montrée dans la figure 2.1. Ainsi, une petite fraction de l'énergie solaire disponible atteignant la surface de la terre sera suffisante pour satisfaire la demande énergétique mondiale. L'une des plus grandes opportunités scientifiques et technologiques intéressantes est de développer des techniques efficaces pour collecter, convertir, stocker et utiliser l'énergie solaire à des coûts abordables. [23]

Les centrales solaires thermiques sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement, c'est une technologie propre qui peut atteindre des rendements très importants. Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par année, grâce à la technologie des centrales solaires. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

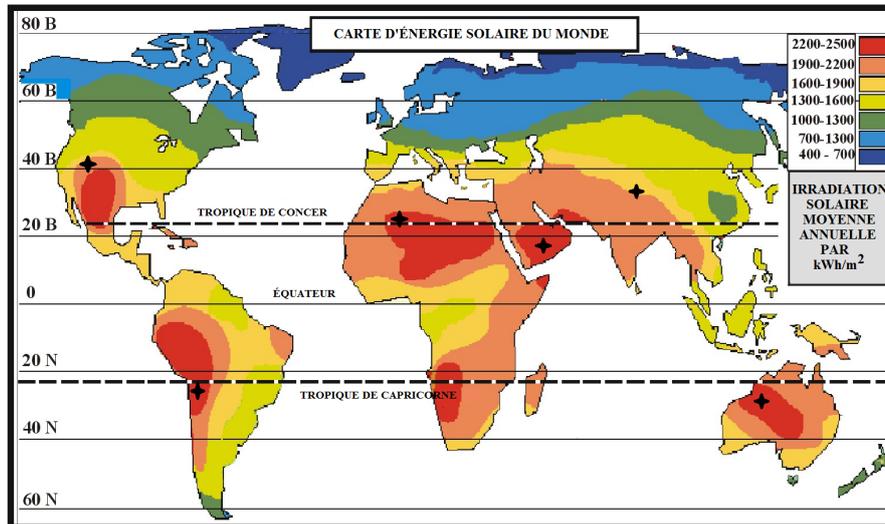


Figure 2.1: Distribution de l'énergie solaire dans le monde.

## 2.2 Les systèmes solaires thermiques

### 2.2.1 Principe de fonctionnement

Dans une centrale thermique, la production d'électricité à partir des irradiances solaires n'est pas un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est néces-

saire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne (selon le type de la centrale solaire), où l'énergie thermique est transmise au fluide calo-porteur (selon le type de la centrale solaire), où l'énergie thermique est transmise au fluide calo-porteur (selon le type de la centrale solaire). L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

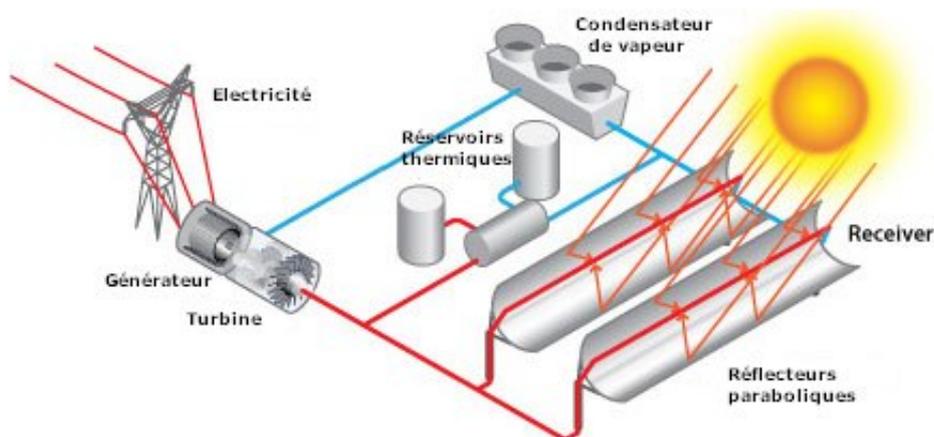


Figure 2.2: Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique

## 2.2.2 Étapes de production d'électricité

Les systèmes solaires thermiques de génération de puissance capturent de l'énergie à partir des rayonnements solaires, ils les transforment en chaleur, et produisent de l'électricité de la chaleur en utilisant des turbines à vapeur, moteurs Stirling ou autres.

Donc, quelle que soit la solution technologique retenue pour la captation des flux solaires ou la transformation de chaleur en électricité, on distingue les blocs fonctionnels interagissant entre eux par le choix du ou des fluides thermodynamiques comme vu dans la figure 2.2 :

- 1 - Collection et concentration des flux solaires par le capteur du récepteur pour chauffer le fluide calo-porteur.
- 2 - Absorption des rayonnements sur les parois du récepteur et transformation en chaleur (production de chaleur)
- 3 - transport et éventuellement stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide calo-porteur selon la température de source chaude et le système utilisé).
- 4 - Conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique.

## 2.2.3 Fluides calo-porteurs

Un fluide caloporteur est un liquide utilisé pour transporter de la chaleur entre plusieurs sources de température, ce terme *calo-porteur* est synonyme de *caloripporteur*. Dans un processus industriel, ces produits sont choisis en fonction de ses propriétés physico-chimiques telles que la viscosité, la capacité thermique, la densité et autres.

Dans les centrales cylindro-paraboliques qu'on va étudier, les huiles qui présentent un bon coefficient d'échange sont les fluides les plus utilisés. Ensuite, le choix du

---

fluide calo-porteur détermine la température maximale admissible, il impose la technologie et les matériaux du récepteur et conditionne la possibilité de stockage.

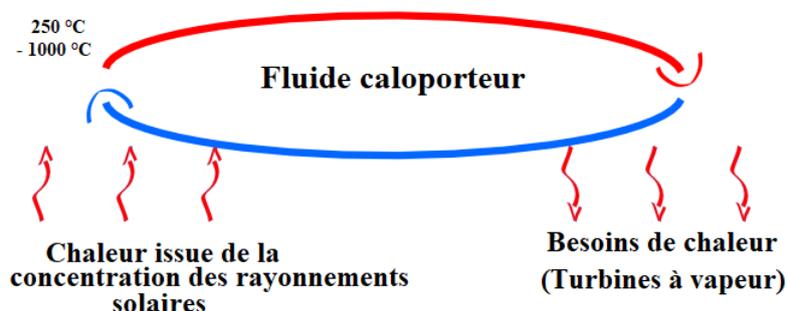


Figure 2.3: Cycle d'échauffement-refroidissement du fluide caloporteur

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

## 2.2.4 Stockage thermique

L'avantage le plus important dans des systèmes solaires thermiques en comparant avec le photovoltaïque est la propriété de stockage de l'énergie dont la source n'est pas contrôlable et n'est pas disponible d'une manière continue toutes les 24 heures.

Il est bien connu qu'on ne peut pas stocker de l'électricité produite dans une centrale, et qu'un réseau électrique doit être stable, où une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels, comme tels provoqués par des chutes de tension. Pour cela, il faut bien réagir rapidement en cas d'absence du soleil à cause des nuages partiels pendant la journée, et il faut aussi assurer la continuité de production de l'électricité pendant la nuit. Plusieurs stations fonctionnent en mode hybride, c'est à dire en parallèle avec des turbines à gaz en cas de diminution de l'énergie solaire. Un stockage thermique peut éliminer cette hybridation, en exploitant cette énergie stocké en cas de besoin. On cite par la suite deux types de stockage utilisés dans des stations solaires.

### 2.2.4.1 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 libèrent 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. [11]

---

### 2.2.4.2 Dans du sel fondu

Le stockage de la chaleur dans du sel fondu a été choisi dans plusieurs centrales tels que la centrale **Gémasolar** en Espagne (Fig 2.7).



Figure 2.4: Deux Réservoirs de stockage thermique

Concrètement, 2.650 héliostats, des miroirs de  $110 \text{ m}^2$  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, 95 % de l'énergie calorifique est concentrée sur le réceptacle, qui atteint une température de  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , cette chaleur est transmise aux sels fondus qui sont portés à  $565 \text{ }^\circ\text{C}$ .

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 (Fig. 2.4) pour alimenter l'échangeur thermique de nuit. Quand le solaire photovoltaïque ne fonctionne que de jour, la centrale peut produire de l'électricité de jour comme de nuit pendant 24 heures sans interruption. [11]

### 2.2.5 Collecteurs solaires

Dans une centrale thermique, le capteur solaire ou collecteur est le composant de base, il est composé d'un réflecteur (miroir), d'une structure métallique, d'un récepteur et d'un système de poursuite solaire, un réflecteur (miroir) est composé de verre pauvre en fer, ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection.

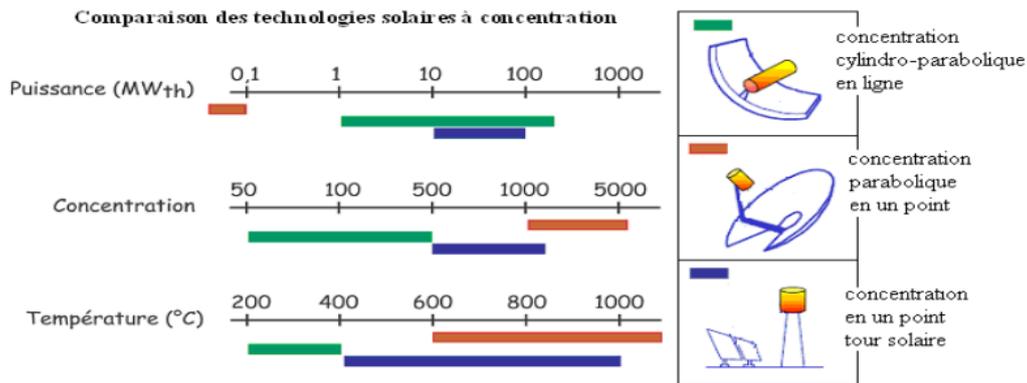


Figure 2.5: Comparaison des technologies solaires à concentration

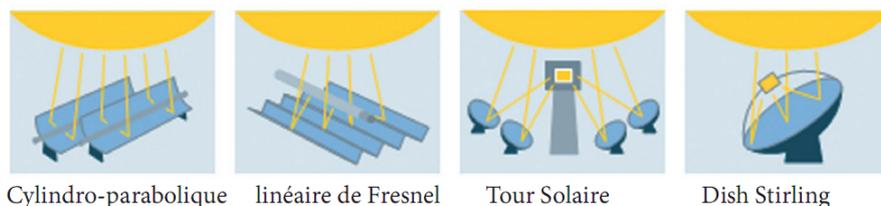
Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97 % du rayonnement incident. La fonction du récepteur est d'absorber l'énergie solaire concentrée, de transférer la chaleur vers le fluide de transfert et de limiter les pertes thermiques (rayonnement et convection). L'intensité de la concentration du collecteur est définie par le facteur (ou taux) de concentration (géométrique)  $C$ , plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte au récepteur (foyer) sera importante.

$$C = \frac{\text{Surface de réflecteur}}{\text{surface de récepteur}} = \frac{S_{rf}}{S_r} = \text{Concentration} \quad (2.1)$$

Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur  $C$  inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. Parmi les centrales thermique connues, les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire se distinguent par leurs dimensions élémentaires, (donc leur puissance), leurs performances optiques (concentration) et thermiques (température) ( Fig 2.5).

## 2.3 Types des stations solaires thermiques

Il y a quatre grandes familles de technologie de concentration solaire (Figure 2.6). Les centrales cylindro-paraboliques sont les plus développées et dominant clairement le marché. Dans ce genre de systèmes, la concentration du rayonnement sur un seul foyer permet d'obtenir une haute température, et pour cela nous choisissons d'étudier ce système dans ce travail.



---

Figure 2.6: Types des centrales solaires

### 2.3.1 Centrale à tour

Cette centrale aussi appelée système de récepteur central (RC) est constituée d'un champ des héliostats (figure 2.7), une tour et un récepteur au sommet de la tour qui reçoit la lumière du soleil concentrée par des héliostats.

Un avantage important de cette centrale c'est que la conversion d'énergie prend une place à un point fixe, cela réduit le besoin de transport de l'énergie. Elle a aussi un facteur de concentration très élevé, donc la température du fluide peut atteindre 1000 °C.



Figure 2.7: Centrale à tour, Gémasolar en Espagne

### 2.3.2 Centrale à effet de cheminée

Les centrales solaires à effet de cheminée (figure 2.8) sont composées d'une tour immense entourée d'une gigantesque serre. La serre est chauffée par le soleil ; l'air chaud circule jusqu'à son seul point de sortie c'est le sommet de la tour. Cet air chaud plus léger que l'air froid s'élève dans la cheminée. Ce déplacement d'air fait tourner des turbines qui produisent d'électricité.

Un avantage importante de cette centrale c'est qu'elle ne pollue pas, elle n'utilise aucune matière chimique pour la transformation d'énergie. Aussi, elle fonctionne jour et nuit et sans intermittence car la chaleur est toujours présente sous la serre même la nuit, mais en pratique, ces centrales ne sont pas encore très développées.



Figure 2.8: Centrale à effet de cheminée

### 2.3.3 Centrale à concentrateurs paraboliques

Les capteurs paraboliques (figure 2.9) fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750 °C.



Figure 2.9: Centrale aux concentrateurs paraboliques

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4 %). Un de leur principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud.

### 2.3.4 Centrale à réflecteur de Fresnel

Il existe un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques (qu'on va décrire par la suite) et la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherches

travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans. Pratiquement, le principe de fonctionnement des deux stations est le même .

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 (Figure 2.10). Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur.

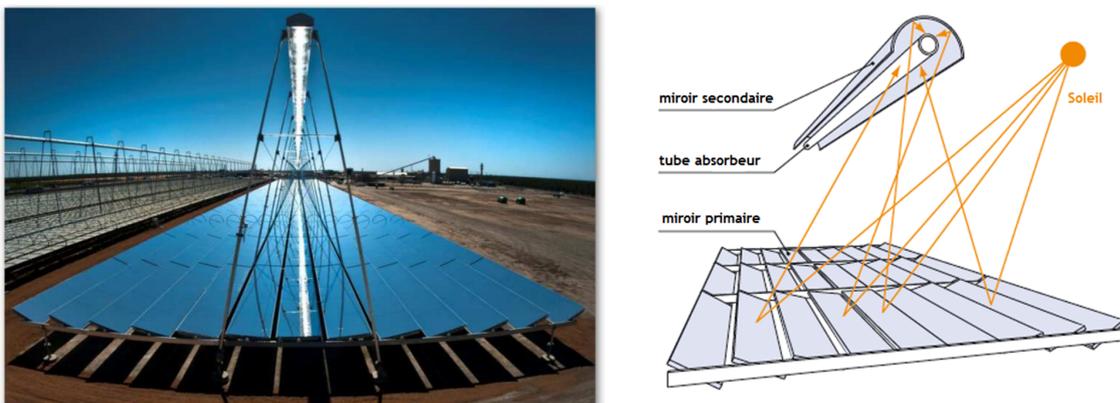


Figure 2.10: Centrale à réflecteur de Fresnel

### 2.3.5 Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques (figure 2.11) 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.



Figure 2.11: Capteur Cylindro-parabolique

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

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

La plate-forme ACUREX d'Almeria (PSA) est la plus connue dans le domaine de la recherche, elle est constituée de 10 boucles, chacune est composée de deux rangées

de 12 modules. La longueur de chaque boucle est de 172 m, et d'une pompe de fonctionnement limité entre la capacité maximale 12 L/s et le seuil de sécurité 2 L/s.

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

Plusieurs classifications d'approche pour la modélisation des systèmes peuvent être trouvées dans la littérature. Les systèmes solaires thermiques peuvent être modélisés à des fins de commande, de simulation, d'optimisation, de tolérance aux défauts et autres. [24]

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

### 2.4.1 Modèle fondamentale

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

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t, l) = \eta_{col} G I(t) - P_{rc} - D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (2.2)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + \rho_f C_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (2.3)$$

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

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

$$A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + q(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = \frac{\eta_{col} G}{\rho_f C_f} I(t) \quad (2.4)$$

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

On peut trouver d'autres modèles fondamentaux simplifiés, tels que :

## 2.4.2 Modèle à paramètres regroupés

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

$$C_1 \frac{dT_{out}(t)}{dt} = C_2 I(t) - C_3 (T_{out}(t) - T_{in}(t)) - C_4 \Delta \bar{T}(t) \quad (2.5)$$

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

## 2.4.3 Modèle bilinéaire

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

$$\frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + v(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t, l) = \gamma I(t) \quad (2.6)$$

tel que :

$$\gamma = \frac{\eta_{col} G}{\rho_f C_f A_f} \quad (2.7)$$

supposant une lisse variation de (HTF) ( transfert de chaleur du fluide ), la température distribuée peut être approximée par :

$$\frac{\partial T_t}{\partial l} \Big|_{l \in (l_{i-1}, l_i)} \approx \frac{T_{f_i} - T_{f_{i-1}}}{l}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.8)$$

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

$$\frac{dx_i}{dt} = -v \frac{(x_i - x_{i-1})}{l} + \gamma I, \quad i = 1, \dots, n. \quad x_0 = T_{in} \quad (2.9)$$

Le modèle peut être écrit sous la forme :

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \quad (2.10)$$

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

$$f(x) = \gamma I \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$g(x) = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 - x_1 \\ \vdots \\ x_n - x_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

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

$$B = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

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

#### 2.4.4 Modèle de résonance

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

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

#### 2.4.5 Modèle empirique

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

##### 2.4.5.1 Modèle linéaire

Ce modèle est obtenu à partir d'identification paramétrique, il est aussi appelé modèle de boîte noire. Les modèles obtenus sont, certes une approximation trop grossière du système. Néanmoins, ils sont très utilisés pour le calcul d'une loi de commande simplifiée. On peut classer les modèles linéaires obtenus à partir d'identifications paramétriques en deux catégories :

---

### A - Modèles d'ordre bas

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

### B - Modèles d'ordre élevé

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

#### 2.4.5.2 Modèle non linéaire

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

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

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

## 2.5 Modélisation mathématique du système

La centrale des collecteurs solaires distribués peut être décrite par un modèle aux paramètres distribués fonction de l'espace et de la température, en considérant quelques suppositions générales et quelques hypothèses. Le système est représenté par le modèle aux équations aux dérivées partielles (EDP) suivant, qui décrit le bilan énergétique :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\delta_p H_t}{\rho_f C_f A_f} (T_m - T_f) - \frac{q}{A_f} \frac{\partial T_f}{\partial l} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{K_{opt} \eta_0 G}{\rho_m C_m A_m} I - \frac{GH_l}{\rho_m C_m A_m} (T_m - T_a) - \frac{\delta_p H_t}{\rho_m C_m A_m} (T_m - T_f) \quad (2.15)$$

où l'indice  $m$  fait référence au métal et l'indice  $f$  au fluide. Les paramètres du système et leurs valeurs sont donnés au tableau suivant :

Où

$$H_v = 2.17.10^6 - 5.01.10^4 T_f + 4.53.10 T_f^2 - 1.64 T_f^3 + 2.1.10^{-3} T_f^4 \quad (2.16)$$

Tableau 2.1: Description des paramètres

paramètres	Description	Valeur	Unité
$\delta_p$	périmètre humide	0.1257	m
$\rho_f$	Densité du f	$903 - 0.672.T_f$	$\text{kg.m}^{-3}$
$C_f$	S.H.C du f	$1820 + 3.478.T_f$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
$D_f$ & $D_m$	Diamètres	0.04 & 0.07	m
$A_f$ & $A_m$	Sections	0.0013 & 0.0038	$\text{m}^2$
$H_t$	C.H.T.C	$q^{0.8} H_v$	$\text{W.°C}^{-1}.\text{m}^{-2}$
$H_l$	C.H.T.C	$0.00249 \Delta \bar{T} - 0.06133$	$\text{W.°C}^{-1}.\text{m}^{-2}$
$I$	Irradiation	variable	$\text{W.m}^{-2}$
$q$	débit de fluide	à contrôler	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$K_{opt}$	efficacité optique	$\eta_{opt} = \eta_0.K_{opt} = 0.7$	—
$\eta_0$	efficacité du collecteur	—	—
$G$	l'ouverture du collecteur	$= \delta_p.\pi = 1.83$	—
$\rho_m$	densité du m	1100	$\text{Kg.m}^{-3}$
$C_m$	S.H.C du m	840	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
$\Delta \bar{T}$	Différence de température	$= \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_a \right)$	$\text{°C}$

et  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  et  $T_a$  sont respectivement : la température d'entrée, la température de sortie et la température ambiante.

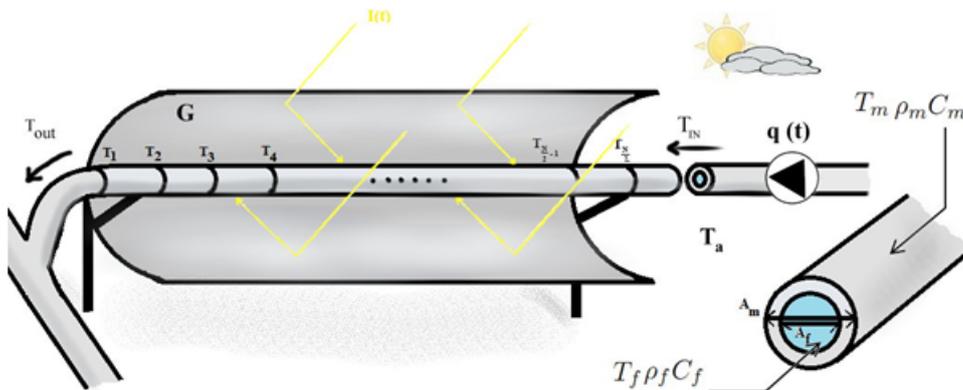


Figure 2.12: Diagramme du collecteur montrant les paramètres et la discrétisation spatiale

Il est important de noter que seulement les paramètres :  $\rho_m$ ,  $C_m$ ,  $A_f$ ,  $A_m$  et  $G$  sont des constantes. Cependant, les paramètres  $H_l$ ,  $\rho_f$ ,  $C_f$  et  $H_t$  dépendent des températures du fluide.

Plusieurs auteurs utilisent des modèles simplifiés, basés sur un bilan énergétique simplifié, où l'on néglige les pertes de chaleur, ou bien ils contrôlent le système en n'utilisant qu'une seule équation qui correspond aux variations de la température du fluide. Cependant, pour avoir une commande précise, la synthèse du régulateur doit être faite sur la base d'un modèle non simplifié comme représenté dans l'équation

2.14 et 2.15. La synthèse d'une telle commande constitue notre première contribution dans le cadre de ce travail.

Le but de notre étude est de contrôler la température de sortie du tube dénoté  $T_{out}(t) = T_f(t, L)$  autour d'une consigne donnée. L'énergie reçue dépend de plusieurs paramètres tels que l'efficacité des collecteurs, la réflectivité des miroirs et la surface réfléchissante effective.

On utilise ce modèle pour la synthèses du contrôleur et pour la simulation. Les paramètres et les propriétés du fluide vont être considérés variables en fonction de la température. On rappelle aussi que le débit du fluide est compris entre  $2 L.s^{-1}$  et  $12 L.s^{-1}$ , à cause des limitations du fonctionnement de la pompe :

$$2 L.s^{-1} \leq q \leq 12 L.s^{-1} \quad (2.17)$$

La différence entre  $T_{out}$  et  $T_{in}$  doit être inférieure à  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , c'est une condition imposée par les fabricants du fluide calo-porteur :

$$T_{out} - T_{in} \leq 80 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.18)$$

La première équation du système aux (EDP) est obtenue à partir du bilan énergétique et contient deux différentielles dépendant de l'espace (x) et du temps (t). Pour des raisons de simplification, la première différentielle va être éliminée en utilisant une discrétisation dans l'espace comme mentionné dans la Fig. 2.12, donc on discrétise le système en  $\frac{n}{2}$  segments ( $\frac{n}{2}$  est prise pour avoir une dimension de système égale à  $n$ ) dans ce cas, on peut introduire une erreur de troncature :

$$\frac{\partial T_f}{\partial l} = \frac{T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})}{\Delta l} + \Theta(\Delta l) \quad (2.19)$$

Alors, on réécrit le système comme suit :

$$\frac{\partial T_f(l_i)}{\partial t} = \frac{\delta_p H_t}{\rho_f C_f A_f} (T_m(l_i) - T_f(l_i)) - \frac{q}{A_f \cdot \Delta l} (T_f(l_i) - T_f(l_{i-1})) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial T_m(l_i)}{\partial t} = \frac{K_{opt} \eta_0 G}{\rho_m C_m A_m} I - \frac{G H_l}{\rho_m C_m A_m} (T_m(l_i) - T_a) - \frac{\delta_p H_t}{\rho_m C_m A_m} (T_m(l_i) - T_f(l_i)) \quad (2.21)$$

Où le vecteur d'état est :

$$X = [T_f(l_1) \ T_f(l_2) \ \cdots \ T_f(l_{\frac{n}{2}}) \ T_m(l_1) \ T_m(l_2) \ T_m(l_3) \ \cdots \ T_m(l_{\frac{n}{2}})]^T \quad (2.22)$$

$$= [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{\frac{n}{2}-1} \ x_{\frac{n}{2}} \ x_{\frac{n}{2}+1} \ x_{\frac{n}{2}+2} \ \cdots \ x_{n-1} \ x_n]^T \quad (2.23)$$

et :

$$\begin{cases} x_1 = T_{out} \\ x_{\frac{n}{2}} = T_{in} \end{cases} \quad (2.24)$$

On écrit aussi les équations du système sous la forme d'état :

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X, u) \\ Y = h(X) \end{cases} = x_1 \quad (2.25)$$

Où

$$u = q(t) \quad (2.26)$$

et

$$\dim(\dot{X}) = \dim(X) = n \times 1 \quad (2.27)$$

Donc

$$\dot{X} = F(X, u) = \begin{bmatrix} \frac{\delta_p \cdot H_t(1)}{\rho_f(1) \cdot C_f(1) \cdot A_f} (x_{\frac{n}{2}+1} - x_1) - \frac{u}{A_f \cdot \Delta_l} (x_1 - x_2) \\ \frac{\delta_p \cdot H_t(2)}{\rho_f(2) \cdot C_f(2) \cdot A_f} (x_{\frac{n}{2}+2} - x_2) - \frac{u}{A_f \cdot \Delta_l} (x_2 - x_3) \\ \vdots \\ \frac{\delta_p \cdot H_t(\frac{n}{2}-1)}{\rho_f(\frac{n}{2}-1) \cdot C_f(\frac{n}{2}-1) \cdot A_f} (x_{n-1} - x_{\frac{n}{2}-1}) - \frac{u}{A_f \cdot \Delta_l} (x_{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}}) \\ \frac{\delta_p \cdot H_t(\frac{n}{2})}{\rho_f(\frac{n}{2}) \cdot C_f(\frac{n}{2}) \cdot A_f} (x_n - x_{\frac{n}{2}}) - \frac{u}{A_f \cdot \Delta_l} (x_{\frac{n}{2}} - T_{in}) \\ \frac{K_{opt} \eta_0 G}{\rho_m C_m A_m} I - \frac{GH_l}{\rho_m C_m A_m} (x_{\frac{n}{2}+1} - T_a) - \frac{\delta_p H_t(1)}{\rho_m C_m A_m} (x_{\frac{n}{2}+1} - x_1) \\ \frac{K_{opt} \eta_0 G}{\rho_m C_m A_m} I - \frac{GH_l}{\rho_m C_m A_m} (x_{\frac{n}{2}+2} - T_a) - \frac{\delta_p H_t(2)}{\rho_m C_m A_m} (x_{\frac{n}{2}+2} - x_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{K_{opt} \eta_0 G}{\rho_m C_m A_m} I - \frac{GH_l}{\rho_m C_m A_m} (x_n - T_a) - \frac{\delta_p H_t(n)}{\rho_m C_m A_m} (x_n - x_{\frac{n}{2}}) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

## 2.6 Commande à base du régulateur PID

Le but de notre travail est de contrôler la température de sortie du fluide à fin de réguler la sortie électrique de la centrale. La meilleure méthode pour atteindre cet objectif c'est de commander la pompe hydraulique qui fait circuler du fluide dans les tubes à des débits différents.

Dans cette partie, nous allons synthétiser un régulateur PID pour contrôler la station décrite par un système d'équations différentielles partielles (EDP). On utilise le bloc PID dans Simulink qui contient l'outil *PID tuning tool*.

Ainsi, pour la simulation, on propose les profils de variation de température d'entrée, température ambiante et les irradiations solaires qui sont montrées ci-après Fig. 2.13, Fig. 2.14 et Fig. 2.15 respectivement. Les paramètres sont supposés perturbés et à des différentes valeurs.

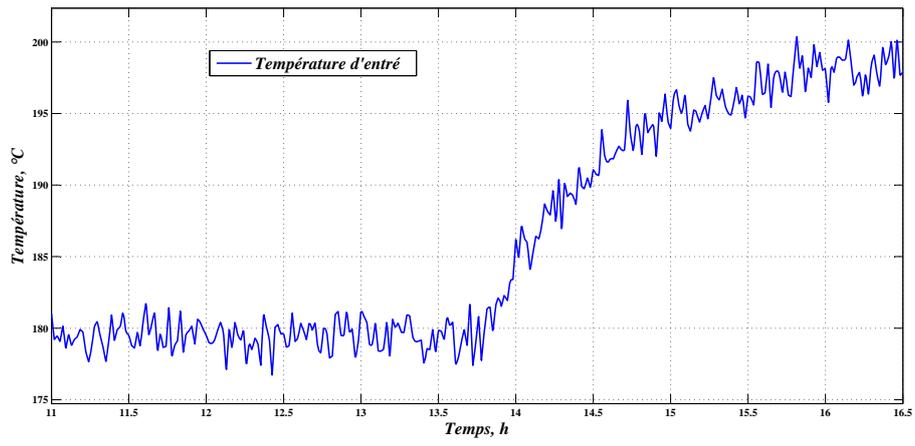


Figure 2.13: Température d'entrée

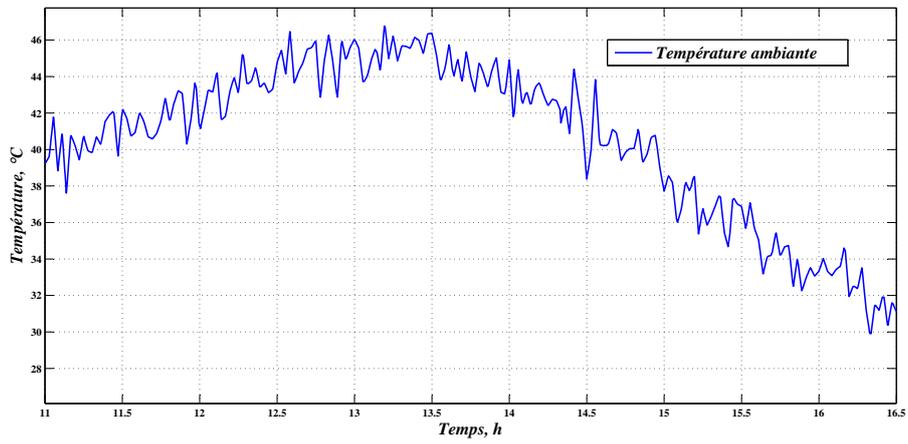


Figure 2.14: Température ambiante

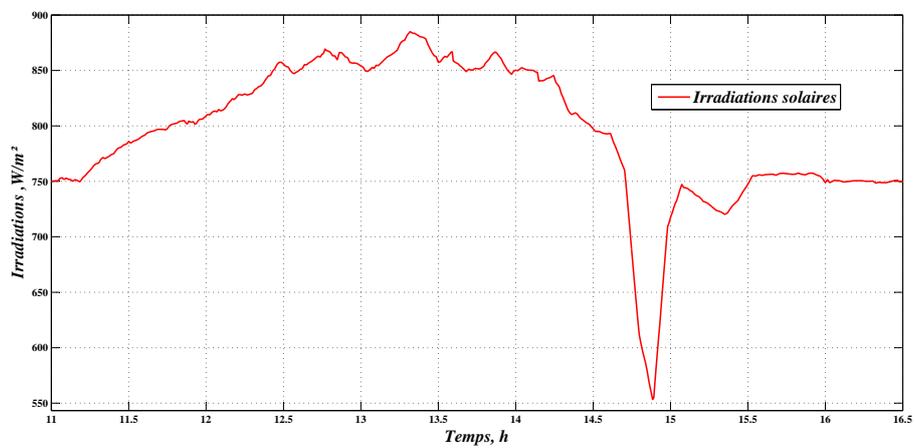


Figure 2.15: Irradiations solaires

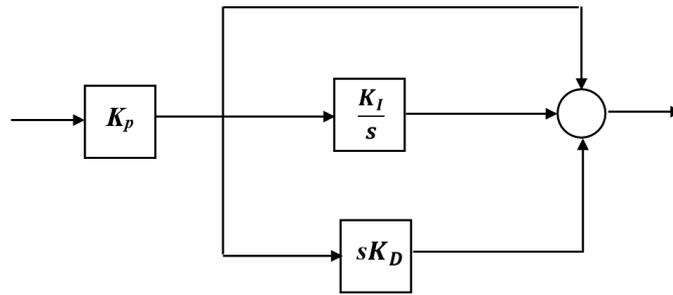


Figure 2.16: Structure du régulateur PID

Le schéma de commande dans Matlab est donné par la suite (Fig. 2.17 ), le système est représenté par deux équations aux dérivées partielles écrites dans un scripte Matlab (**file.m**) et introduit à Simulink par une s-fonction.

La forme utilisée pour le régulateur PID c'est la forme idéale (ou standard), dont la structure est montrée dans la figure 2.16, et sa fonction de transfert conventionnelle s'écrit :

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{s} + sK_d \right) \quad (2.29)$$

Avec :  $K_p$  le gain de l'action proportionnelle,  $K_i$  celui de l'action intégrale, et  $K_D$  celui de l'action dérivée.

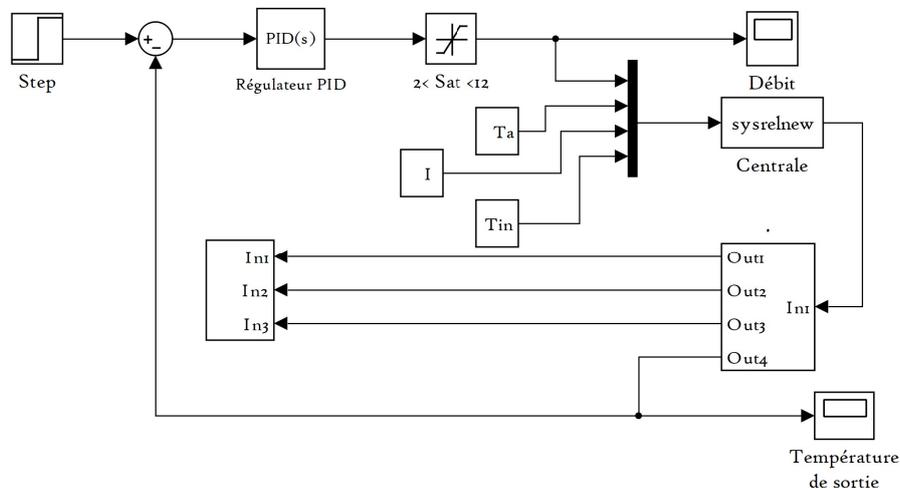


Figure 2.17: Schéma de commande par un régulateur PID

La figure 2.18 montre une fenêtre de réglage des paramètres du régulateur PID, on varie le temps de réponse et le comportement transitoire représenté par un paramètre de robustesse, en même temps, on refait la simulation en évaluant la réponse jusqu'à ce qu'on arrive à un résultat admissible. C'est une opération récursive qui prend du temps pour conclure les bons choix des paramètres pour la meilleure réponse en termes de la stabilité, la robustesse et le temps de réponse, en condition d'avoir un signal de commande admissible qui représente le fonctionnement de la pompe,

cela est un facteur très important qui implique des conditions d'application réelle dans l'industrie, où les résultats doivent être conformes aux matériaux du système, en évitant les mauvaises opérations qui peuvent influencer sur les performances de la pompe, ou diminuer sa durée de vie ou même l'endommager. [25]

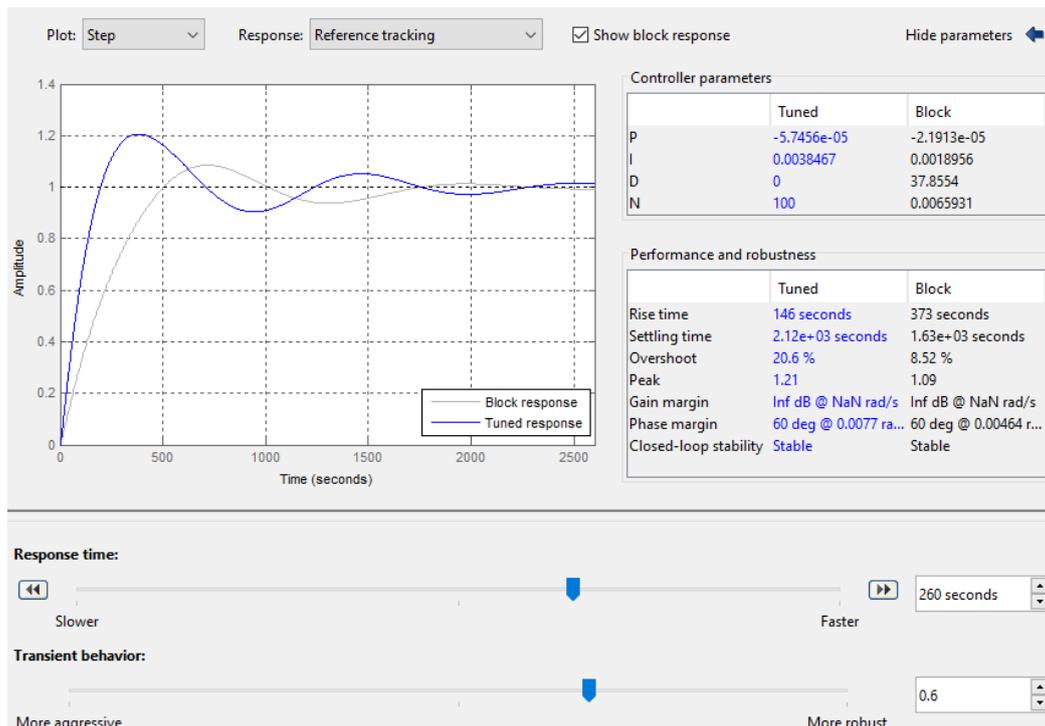


Figure 2.18: Fonction "PID Tuner" dans Simulink

Ainsi, la variation du débit de la pompe doit être progressive et régulière, car toute variation brusque peut créer de fortes turbulences et provoque la défaillance de la pompe. Une variation brusque dans le fonctionnement de la pompe s'est produit lors d'une large variation de consigne ou d'une variation paramétrique soudaine, c'est une conséquence d'une réponse rapide à ces changements. Tandis que, un bon réglage doit supposer la recherche du bon compromis entre les critères de rapidité, stabilité et précision, qui sont bien souvent contradictoires.

Dans les figures suivantes, On donne deux simulations avec deux choix de temps de réponse.

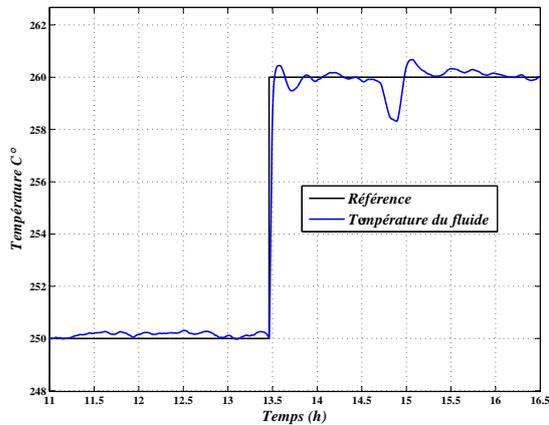


Figure 2.19: Réponse du système  $t_{s1}$

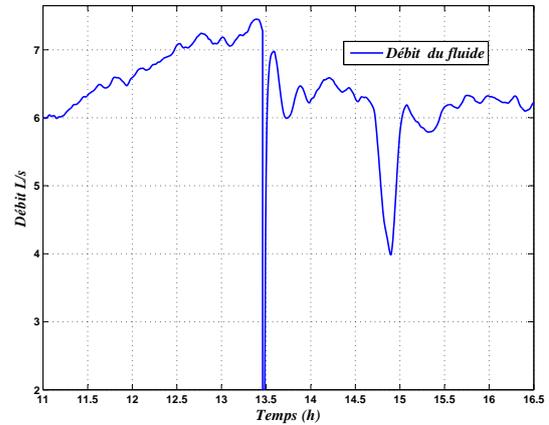


Figure 2.20: Signal de commande  $t_{s1}$

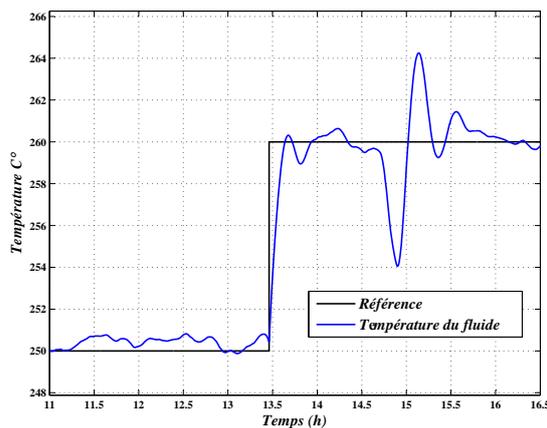


Figure 2.21: Réponse du système avec  $t_{s2}$

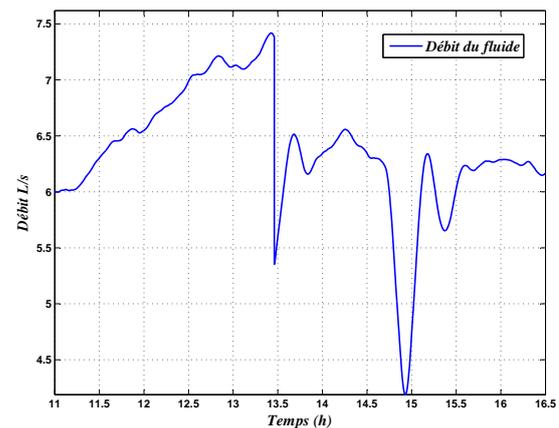


Figure 2.22: Signale de commande avec  $t_{s2}$

La réponse du système commandé par un régulateur PID vue au Figure 2.19 est rapide ( $t_{s1} = 180\text{ s}$ ), un peu précise, avec des petits dépassements de consigne en cas de variation de référence ou de changement brusque des irradiances solaires (effets des nuages partiels). Mais, la rapidité de la réponse est générée par une grande impulsion dans le signal de commande qui représente le débit du fluide (Figure 2.20). Ainsi, pour éviter ce phénomène il faut diminuer la rapidité en augmentant le temps de réponse, soit  $t_{s2} = 450\text{ s}$  (Figure 2.21).

En diminuant la vitesse de la réponse, on évite les grandes impulsions dans le signal de commande, mais la précision a encore diminuée. En effet, on peut arriver aux meilleurs résultats en répétant ce processus des dizaines de fois, mais on n'assure pas d'avoir un régulateur robuste contre toutes les variations paramétriques et les incertitudes.

---

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la notion générale des systèmes solaires thermiques et leur principes de fonctionnement, puis on a classifié les différents types des stations solaires thermiques, ensuite, nous avons cité les approches existantes dans la littérature pour modéliser ces systèmes. La station étudiée dans notre travail c'est celle du capteur cylindro-parabolique, car ce type de station est le plus utilisé, par le modèle à paramètres distribués. Ce système est considéré incertain, plusieurs paramètres du fluide sont dépendants des températures.

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

# Chapitre III

---

**Commande de la station solaire  
à base du CDM**

# CHAPITRE 3

## COMMANDE DE LA STATION SOLAIRE À BASE DU CDM

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Superviseur flou de commutation entre des contrôleurs CDM</b>	<b>61</b>
4.2.1	Méthodologie de commande	62
4.2.2	Fuzzification	62
4.2.3	Moteur d'inférence	64
4.2.4	Agrégation des règles	65
4.2.5	Synthèse de contrôleurs CDM	65
4.2.6	Fonction de regroupement <i>c</i> -moyennes <i>c-Means Clustering</i>	65
<b>4.3</b>	<b>Résultats de simulation</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>67</b>

---

### 3.1 Introduction

DANS le chapitre précédent, on a décrit une station solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques par un système des équations aux dérivées partielles, nous avons commandé le système par un régulateur PID, qui n'a pas prouvé sa robustesse contre les variations des paramètres et des incertitudes.

Ainsi, nous allons développer une autre commande par un régulateur synthétisé à base de la méthode CDM. En réalité, l'application de la méthode peut être considérée comme une extension de CDM, car la variable de la commande ne sera pas la commande  $u$  mais la variation dans  $u$  soit  $\Delta u$  (Figure 3.1), on peut alors dire **CDM-étendu**.

### 3.2 Point de fonctionnement et modèle de contrôle

Dans ce travail on utilise la structure à trois blocs basée sur la commande CDM (Fig. 3.1). Cette méthode nécessite l'obtention de la fonction de transfert du système, mais tant que le modèle est non-linéaire, on doit faire une linéarisation autour d'un point de fonctionnement  $P_0(x_0, u_0)$ .

En outre, pour avoir  $\dot{X} = 0$ , ce point de fonctionnement doit être un point d'équilibre ç.à.d dans le régime permanent. On propose d'utiliser les résultats d'une simulation réelle d'une commande appliquée à la station ACUREX publiée dans certains travaux tels que les résultats de Camacho [26]. Concernant la linéarisation, on va utiliser les séries de Taylor.

Donc, En utilisant les séries de Taylor, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{X} \simeq \dot{X}_0 + \frac{\partial F}{\partial X} |_{(X_0, u_0)} (X - X_0) + \frac{\partial F}{\partial u} |_{(X_0, u_0)} (u - u_0) + \zeta(X, u) \\ Y \simeq \frac{\partial h}{\partial X} |_{(X_0, u_0)} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où

$$\begin{cases} u - u_0 = \Delta u. \\ X - X_0 = \Delta X \\ Y - Y_0 = \Delta Y \end{cases} \quad (3.2)$$

et

$$(X - X_0) = \dot{X} - \dot{X}_0 = \dot{X} \quad (\dot{X}_0 = 0). \quad (3.3)$$

Alors

$$\Delta \dot{X} = \dot{X} \quad (3.4)$$

En prenant

$$\begin{cases} A_F = \frac{\partial F}{\partial X} |_{(X_0, u_0)} \\ B = \frac{\partial F}{\partial u} |_{(X_0, u_0)} \\ C = \frac{\partial h}{\partial X} |_{(X_0, u_0)} \end{cases} \quad (3.5)$$

On écrit le système dans l'espace d'état en éliminant les erreurs du seconde ordre comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\Delta X} = A_F \cdot \Delta X + B \cdot \Delta u \\ \Delta Y = C \cdot \Delta X \end{cases} \quad (3.6)$$

Où les matrices  $A_F$ ,  $B$  et  $C$  sont définies dans l'annexe A. Le vecteur d'état contient  $n$  éléments mais uniquement  $T_{in}$  et  $T_{out}$  sont définis à partir du choix du point de fonctionnement avec  $I_0$  et  $u_0$ .

Les températures des segments indéfinis peuvent être déduites à partir des équations du système (EDP) qui représentent l'évolution du fluide dans le tube. Donc, ces équations autour du point de fonctionnement sont comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = F_1(x_1, x_2, x_{\frac{n}{2}+1}, u_0) = 0 & (3.7.1) \\ \dot{x}_2 = F_2(x_2, x_3, x_{\frac{n}{2}+2}, u_0) = 0 & (3.7.2) \\ \vdots \\ \dot{x}_{\frac{n}{2}} = F_{\frac{n}{2}}(x_{\frac{n}{2}}, x_n, u_0) = 0 & (3.7.\frac{n}{2}) \end{cases} \quad (3.7)$$

et les équations du métal sont les suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_{\frac{n}{2}+1} = F_{\frac{n}{2}+1}(x_1, x_{\frac{n}{2}+1}, u_0) = 0 & (3.8.\frac{n}{2} + 1) \\ \dot{x}_{\frac{n}{2}+2} = F_{\frac{n}{2}+2}(x_2, x_{\frac{n}{2}+2}, u_0) = 0 & (3.8.\frac{n}{2} + 2) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = F_n(x_n, x_{\frac{n}{2}}, u_0) = 0 & (3.8.n) \end{cases} \quad (3.8)$$

On tire  $x_{\frac{n}{2}+1}$  à partir de l'équation (3.8. $\frac{n}{2} + 1$ ), puis on la remplace dans l'équation (3.7.1); et on tire  $x_2$  à partir de la dernière équation et on la remplace dans  $\dot{x}_{\frac{n}{2}+2}$  etc... et ainsi de suite pour avoir les températures de tous les segments.

Après la déduction de la matrice du système dans l'espace d'état, on construit la fonction de transfert  $G(s)$  :

$$G(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = C \cdot (sI - A_F)^{-1} \cdot B \quad (3.9)$$

Pour la simulation, le nombre de troncatures est un paramètre à choisir, par exemple 15. Si c'est le cas, le dénominateur de la fonction de transfert calculée est en général de  $dim = n = 30$ .

### 3.3 Schéma de contrôle

On donne le digramme en bloc de la commande CDM appliquée à la centrale solaire

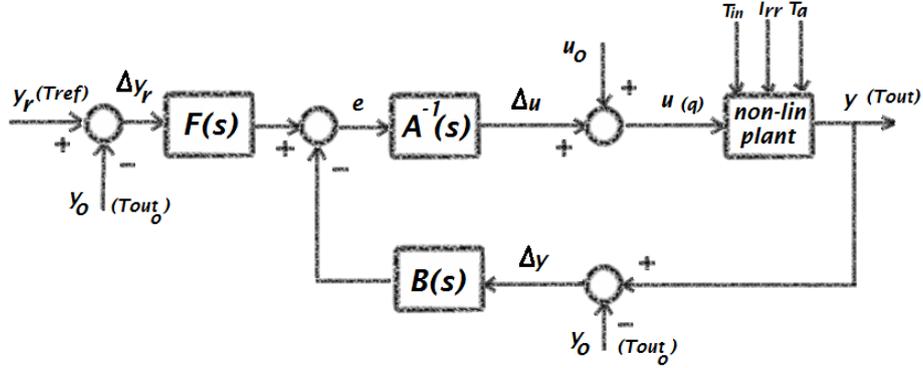


Figure 3.1: Digramme en bloc de la commande CDM appliquée sur le système non-linéaire

Premièrement, on choisit un point d'équilibre, et on linéarise le système autour de ce dernier. Prenons :

$$P_0 \begin{cases} T_{out} = 250 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{in} = 180 \text{ } ^\circ\text{C} \\ I = 750 \text{ W/m}^2 \\ u = 7.3 \text{ L/s} = 0.0073 \text{ m}^3/\text{s} \end{cases} \quad (3.10)$$

Le système linéaire autour de  $P_0$  est représenté par la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{-54.03s^{29} - 157.9s^{28} - \dots - 1.945 \cdot 10^{-31}s - 3.27 \cdot 10^{-34}}{s^{30} + 2.764s^{29} + \dots + 3.868 \cdot 10^{-36}s + 3.846 \cdot 10^{-39}} \quad (3.11)$$

Où  $G(s)$  est trouvée à partir de la formule 3.9, avec les matrices  $A_F$ ,  $B$  et  $C$  du système linéarisé sont données à l'annexe A.

### 3.4 Modèle réduit

On voit que la dimension du dénominateur de  $G(s)$  est élevée ( $\dim(G(s)) = n = 30$ ), dans ce cas, la synthèse du régulateur est difficile, alors on doit réduire l'ordre du système, en utilisant une fonction Matlab qui calcule les *gramians*, et réduit l'ordre de  $\dim = n$  à 2 ou 3 comme désiré ( la fonction *modred* dans *balreal*) pour obtenir une fonction réduite dénotée  $G_r(s)$ .

La fonction de transfert réduite  $G_r(s)$  sera utilisée uniquement dans la synthèses du régulateur, puis ce régulateur sera appliqué sur le système non-linéaire.

En utilisant la fonction de réduction du modèle on obtient :

$$G_r(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{-3610s^2 - 41.55s - 1.287}{s^2 + 0.00667s + 1.513 \cdot 10^{-5}} \quad (3.12)$$

La comparaison entre le diagramme de Bode du modèle  $G(s)$  et le modèle approximé  $G_r(s)$  est montrée sur la Fig. 3.2.

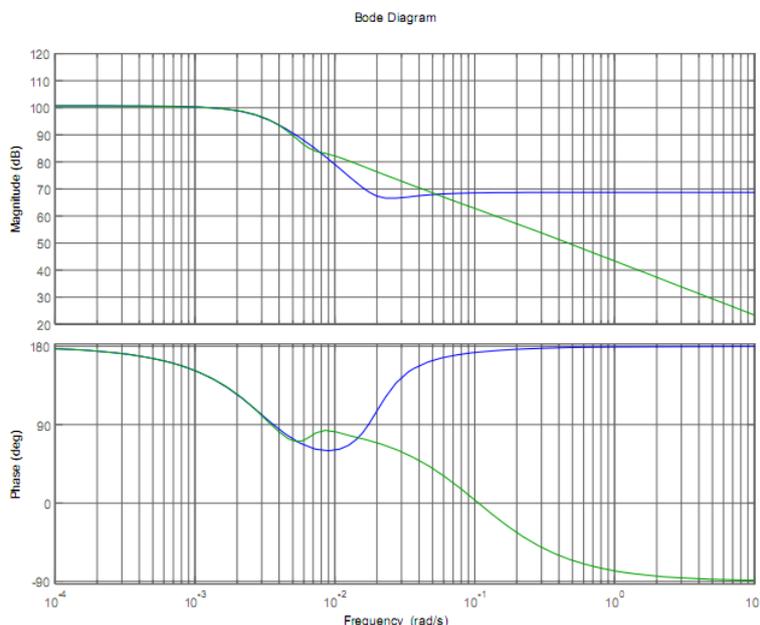


Figure 3.2: Comparaison entre le diagramme de Bode du modèle  $G(s)$  (en vert) et le modèle approximé de seconde ordre  $G_r(s)$  (en bleu)

On constate que la magnitude et la phase du système réduit sont les mêmes que celles du système original pour les fréquences inférieures à  $10^{-2} Hz$ , ce qui convient à notre cas puisque l'étude se fera en basses fréquences.

Les simulations seront effectuées en utilisant Matlab/Simulink (figure 3.6), on contrôle le système non-linéaire avec le contrôleur CDM dont la structure est donnée précédemment, ce système est représenté par deux équations aux dérivées partielles écrites dans un scripte Matlab (file.m) et introduit à Simulink par une s-fonction.

Encore, on considère un modèle lié aux perturbations de la forme échelon, en utilisant les formes polynomiales données dans le Tableau 1.1.

Pour la synthèse du régulateur CDM, on donne des valeurs de  $\tau$  et de  $a_0$  pour trouver les polynômes, en utilisant la forme de Sylvester. Comme décrit précédemment, on varie la valeur de  $\tau$  jusqu'à ce qu'on trouve la meilleure réponse, cela est fait avec une fonction répétitive en Matlab.

Dans ce cas, on aura :

$$\tau = 278.5 [s], \quad a_0 = 10 \quad (3.13)$$

Alors, le polynôme caractéristique  $P(s)$  s'écrit :

$$P(s) = 4.813 \times 10^8 s^4 + 1.728 \times 10^7 s^3 + 3.102 \times 10^5 s^2 + 2785s + 10 \quad (3.14)$$

Ainsi, les polynômes du contrôleur sont trouvés comme suit :

$$A(s) = 5836s^2 + 201900s \quad (3.15)$$

$$B(s) = -5331s^2 - 74.17s - 0.3109 \quad (3.16)$$

et le pré-contrôleur est donné :

$$F(s) = \left( \frac{P(s)}{N(s)} \right) \Big|_{(s=0)} = \frac{0.4}{-1.287} = -0.3109 \quad (3.17)$$

### 3.5 Résultats et simulations

Nous donnons des simulations de la réponse du système commandé par le régulateur CDM, qui a été synthétisé après la linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement, ainsi, les variations des irradiations et des températures doivent être dans un domaine de fonctionnement, on utilise les profils supposés dans les figures (3.3 - 3.5). Plusieurs tests seront effectués en comparant les résultats avec ceux du régulateur PID en utilisant quelques critères.

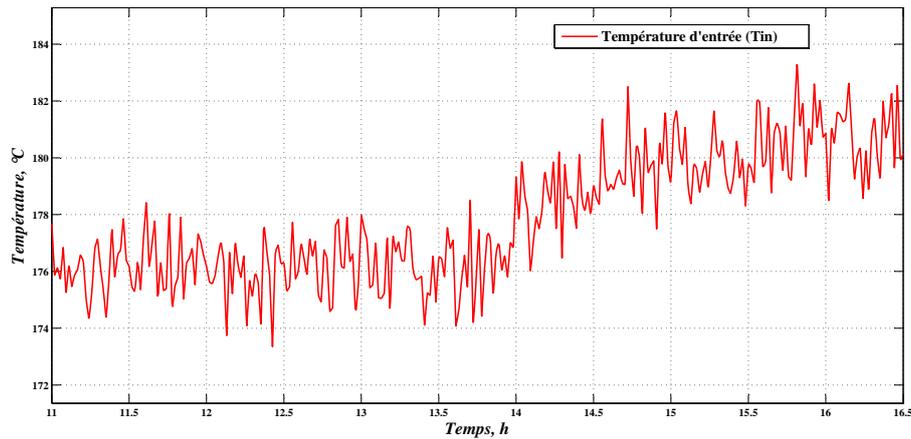


Figure 3.3: Température d'entrée

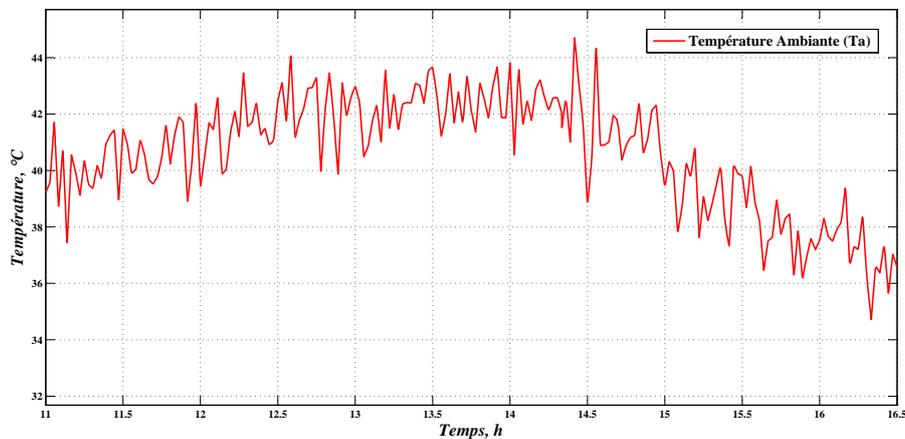


Figure 3.4: Température ambiante

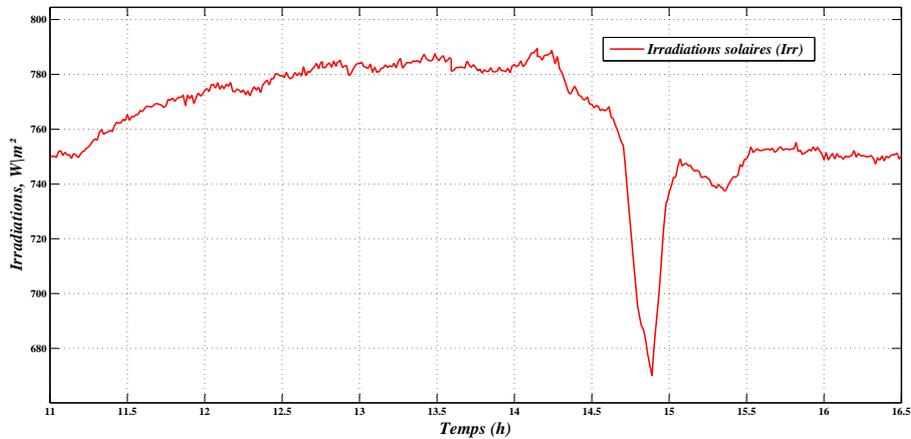


Figure 3.5: Irradiations solaires

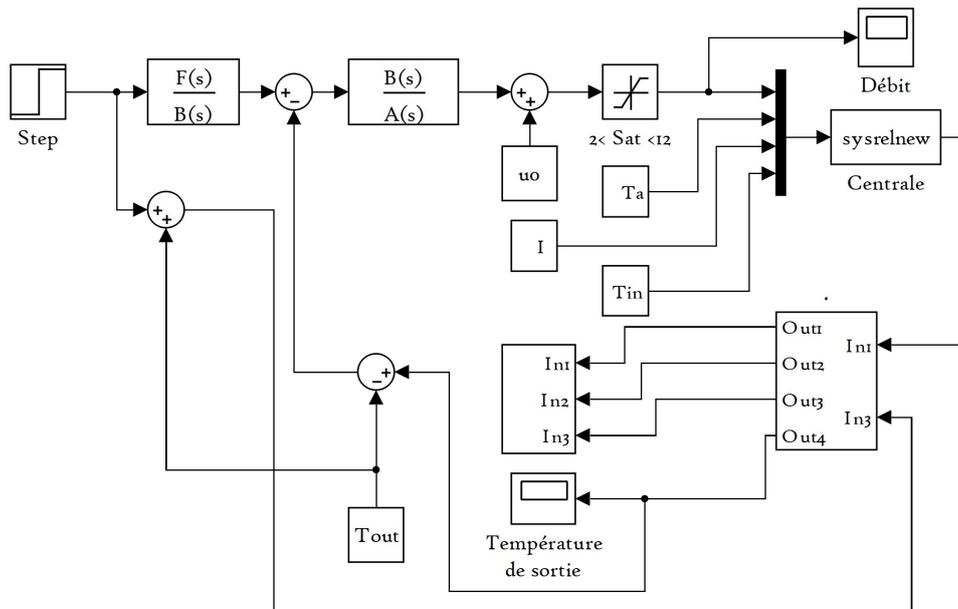


Figure 3.6: Schéma de commande par un régulateur CDM

### 3.5.1 Critères de performances

La comparaison entre les deux contrôleurs CDM et PID est basée sur les critères de performances suivants, basés sur l'intégrale de l'erreur, ils sont utilisés comme une mesure pour évaluer la précision de la poursuite de référence et le rejet de perturbation. IAE c'est l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur de poursuite qui pénalise les petites erreurs :

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.18)$$

ITAE l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur multipliée par le temps qui pénalise les erreurs qui persistent longtemps

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (3.19)$$

et ISE c'est l'intégrale du carré de l'erreur qui pénalise les grandes erreurs :

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (3.20)$$

Les Fig. 3.7 et Fig. 3.8 illustrent les réponses des contrôleurs CDM et PID pour une référence de la forme échelon, avec le débit du fluide correspondant.

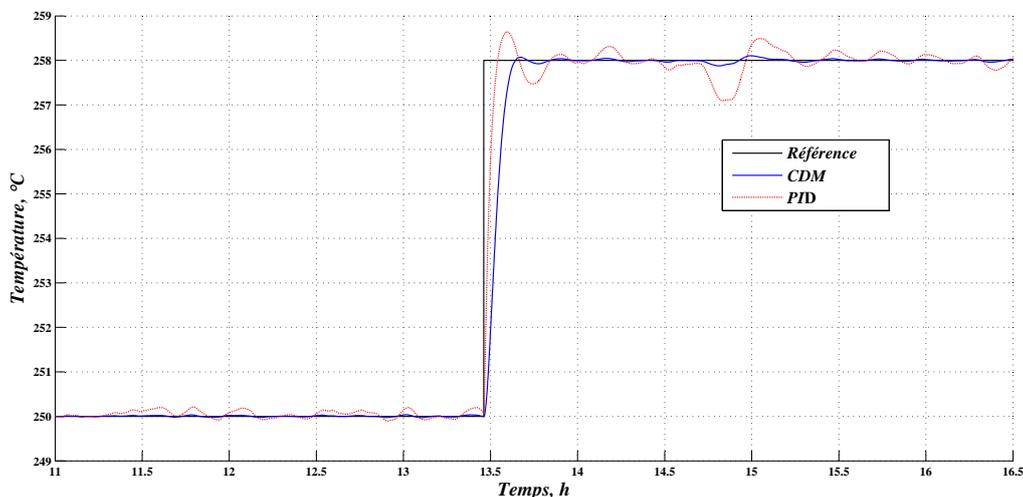


Figure 3.7: Réponse échelon

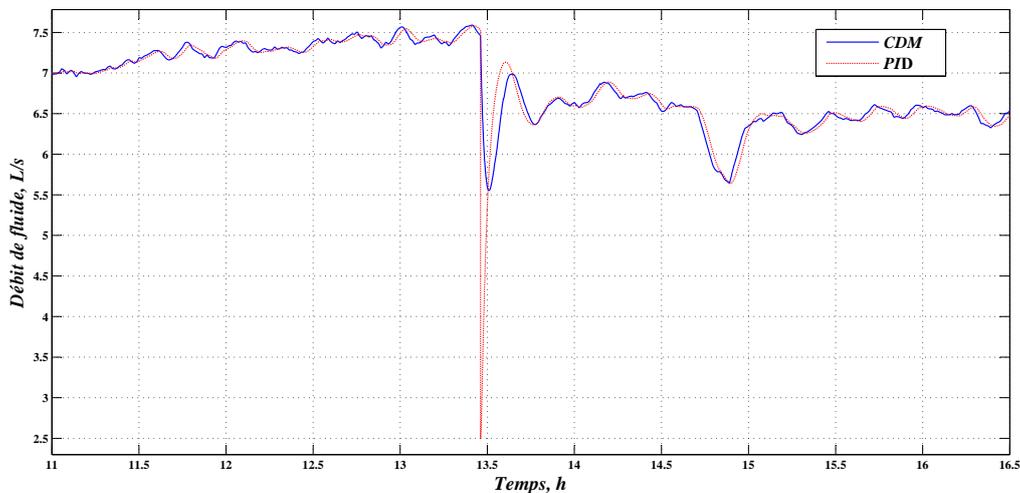


Figure 3.8: Débit de fluide

Tableau 3.1: Performances du régulateur CDM et régulateur PID appliqués à la centrale solaire

Contrôleur	IAE	ISE	ITAE	temps de montée	temps de réponse	pic de dépassement	Pic de perturbation
CDM	2472	15640	$2.525 \cdot 10^7$	432 s	612 s	0 (0 %)	0 (0 %)
PID	5828	8156	$5.441 \cdot 10^7$	108 s	1260 s	0.5 (5 %)	2.5 (25 %)

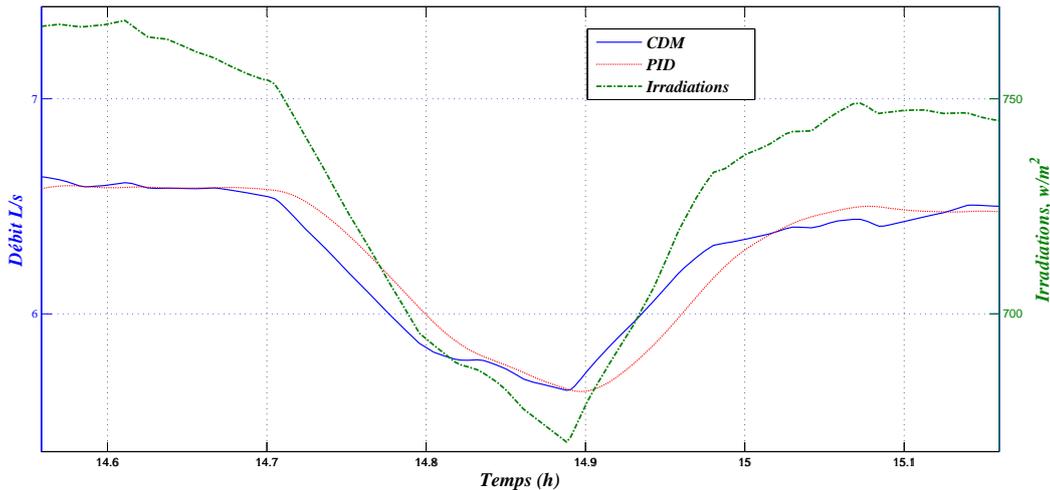


Figure 3.9: Zoom sur la figure des signaux de commande avec les irradiances

On voit dans le Tableau 3.1 que le contrôleur PID donne le meilleur temps de montée, néanmoins, le régulateur CDM présente de meilleurs indices de performance et un meilleur temps de réponse, en plus de l'absence de pic de dépassement ou pic de perturbations. Sauf que ISE est un peu large à cause du temps de montée important dans le cas du régulateur CDM.

Une remarque très importante, les deux débits du fluide dans la figure 3.8 semblent pareils avec une différence dans les températures de sortie, mais en faisant un zoom (Figure 3.9), on voit bien que le retard dans la réponse dans le cas du régulateur PID est considérable par rapport au régulateur CDM (plus d'une minute, où la différence dans les irradiances est plus de  $30 \text{ W/m}^2$  et dans le débit du fluide est plus de  $0.4 \text{ L/s}$ ). Donc un petit retard dans le fonctionnement de la pompe même d'une seule minute, avec une diminution brusque des irradiances solaires peut laisser une différence dans la réponse, mais c'est moins de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Afin d'effectuer plus de tests d'évaluation du contrôleur CDM, on fait une autre simulation pour les cinq heures et demi (entre 11 : 00 et 16 : 30). Le contrôleur a été évalué avec des variations de référence sur un domaine centré par le point de fonctionnement (entre  $242 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $254 \text{ }^\circ\text{C}$ ), avec les mêmes profils des irradiances solaires, de la température d'entrée et de la température ambiante.

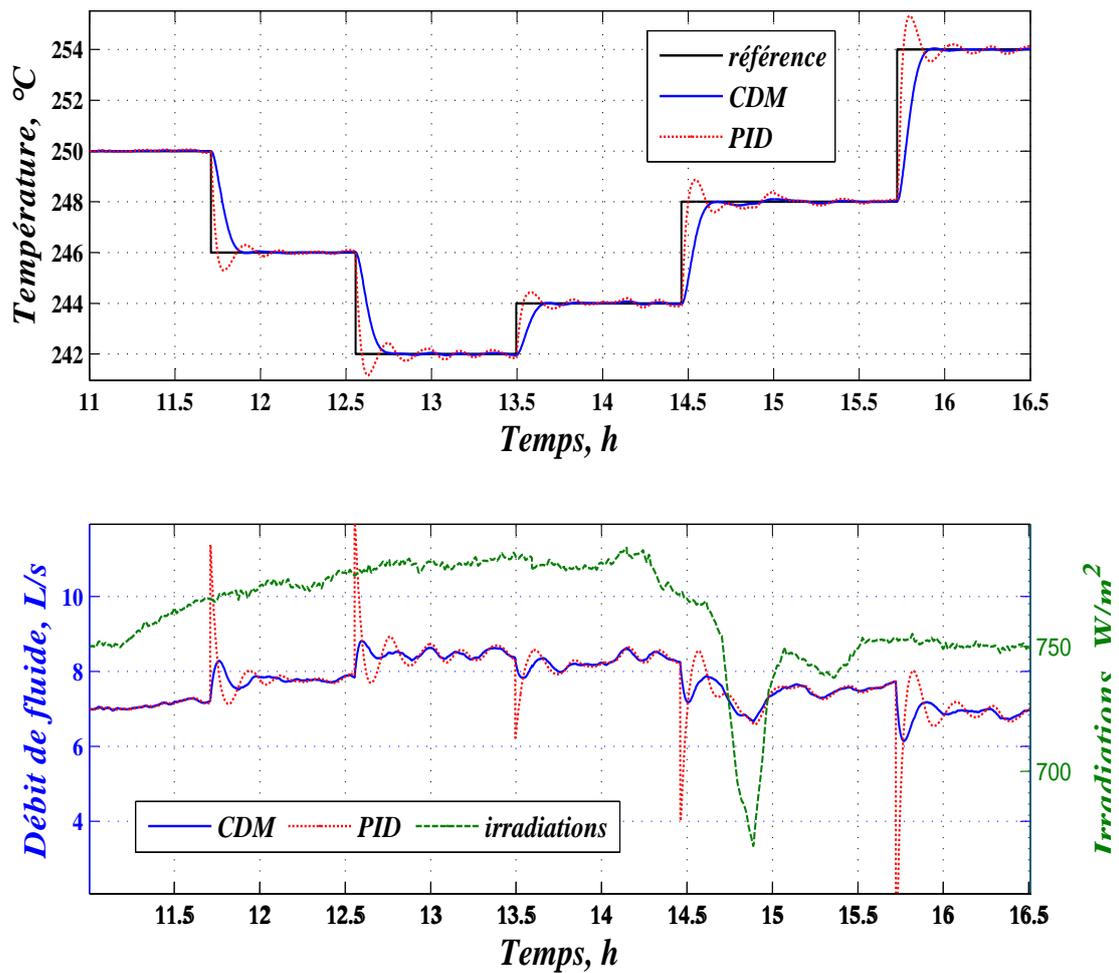


Figure 3.10: Réponse avec des variations de consigne

La figure 3.10 et le tableau 3.2 montrent bien les bonnes performances de la commande CDM en terme de la poursuite de la référence et le rejet des perturbations, que ce soit en cas d'une variation brutale des irradiances solaires (EX à 15 :00), due à l'existence des perturbations dans les profils de la température ambiante et de la température d'entrée, ou en cas d'une variation de la référence à des valeurs de 4 °C à 6 °C. Le signal de commande (le débit de la pompe) est admissible, avec des petites impulsions, sachant que le bon fonctionnement de la pompe peut considérablement augmenter sa durée de vie. Les figures 3.11 et 3.12 montrent la dynamique interne dans le tube.

Tableau 3.2: Performances des régulateurs CDM et /PID à la centrale solaire

Contrôleur	IAE	ISE	ITAE
CDM	$1.087 \cdot 10^4$	$4.937 \cdot 10^4$	$9.838 \cdot 10^7$
PID	$1.375 \cdot 10^4$	$2.747 \cdot 10^4$	$1.299 \cdot 10^8$

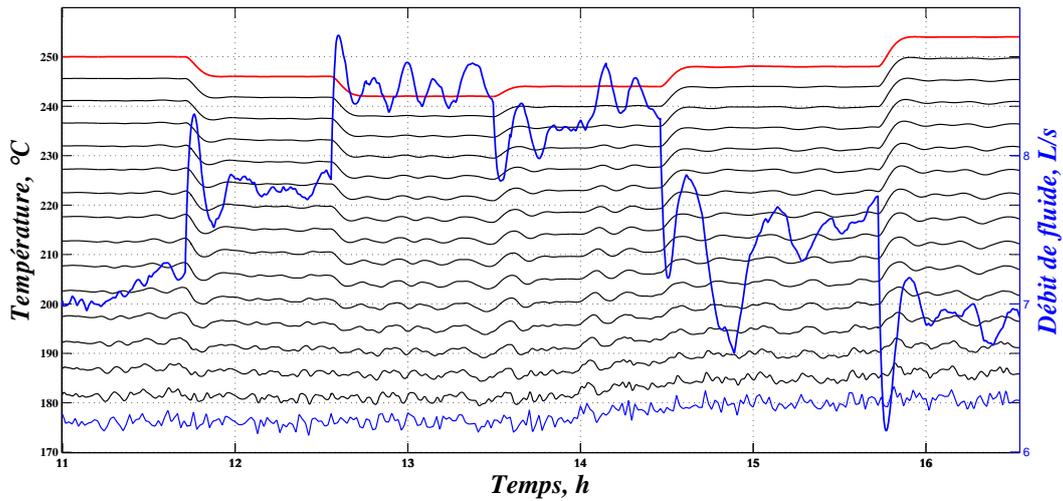


Figure 3.11: Température de sortie, d'entrée et des segments du fluide en 2-D avec le débit

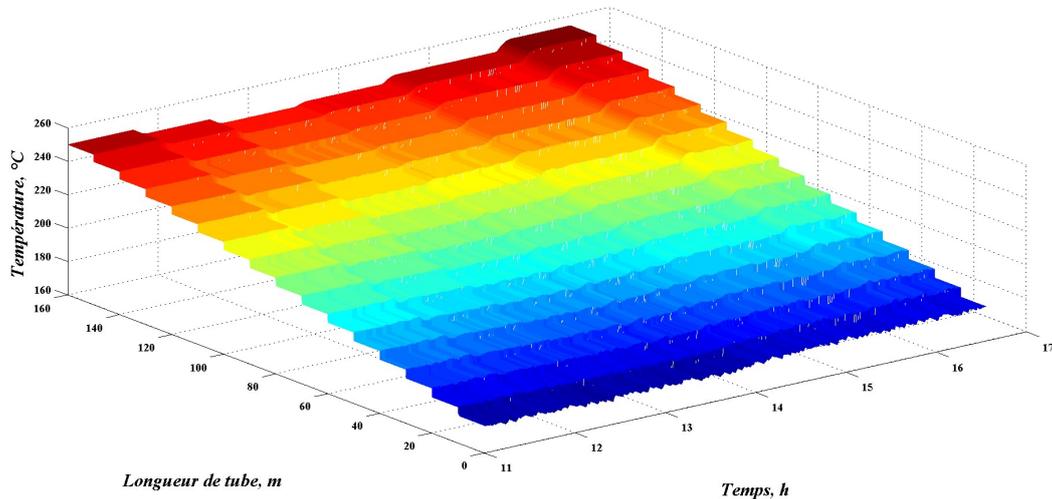


Figure 3.12: Dynamique interne montre la distribution de la température en 3D

### 3.6 Tests de robustesses

Afin d'évaluer la robustesse du contrôleur synthétisé par la méthode CDM on fait d'autres simulations. La robustesse sera supposée contre les erreurs de modélisation et les variations des paramètres du système avec le temps, tels que la densité du fluide et la capacité thermique ou autres. Ces propriétés se changent par l'utilisation des durées définies parfois par le constructeur. Ainsi, la modélisation peut porter des erreurs dans les paramètres, ça peut influencer sur la synthèse du régulateur. Le bon régulateur doit être robuste contre ces variations paramétriques et doit négliger l'influence des erreurs de modélisation.

On fera plusieurs tests, le premier sera porté sur la variation de la densité du fluide, qui pratiquement augmente avec le temps. On fait trois variations de ce paramètre, l'augmentation par 5 %, 10 % et par 15 %, Donc :

$$\rho_f \begin{cases} \rho_{f_1} = 1.05 \rho_{f_0} \\ \rho_{f_2} = 1.10 \rho_{f_0} \\ \rho_{f_3} = 1.15 \rho_{f_0} \end{cases} \quad (3.21)$$

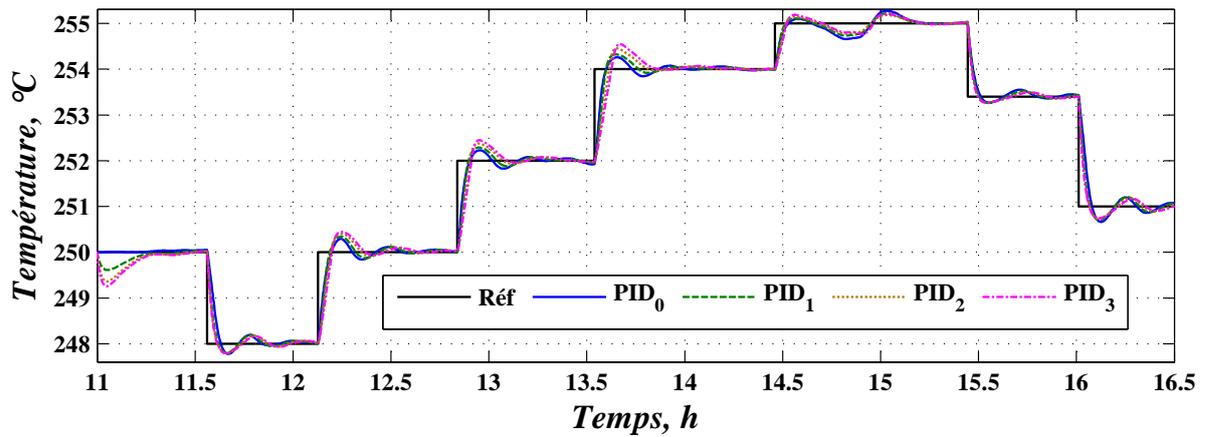
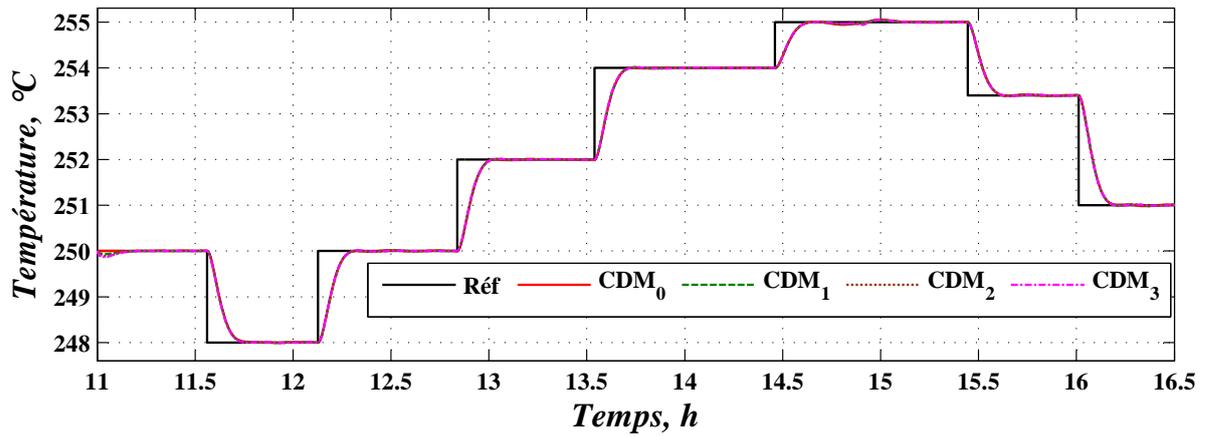


Figure 3.13: Test de robustesse pour la variation de la densité du fluide

Le deuxième test sera porté sur la variation de la capacité calorifique du fluide, qui diminue avec le temps. Avec une diminution par 5 %, 10 % et par 15 %, Donc :

$$C_f \begin{cases} C_{f_1} = 0.95 C_{f_0} \\ C_{f_2} = 0.90 C_{f_0} \\ C_{f_3} = 0.85 C_{f_0} \end{cases} \quad (3.22)$$

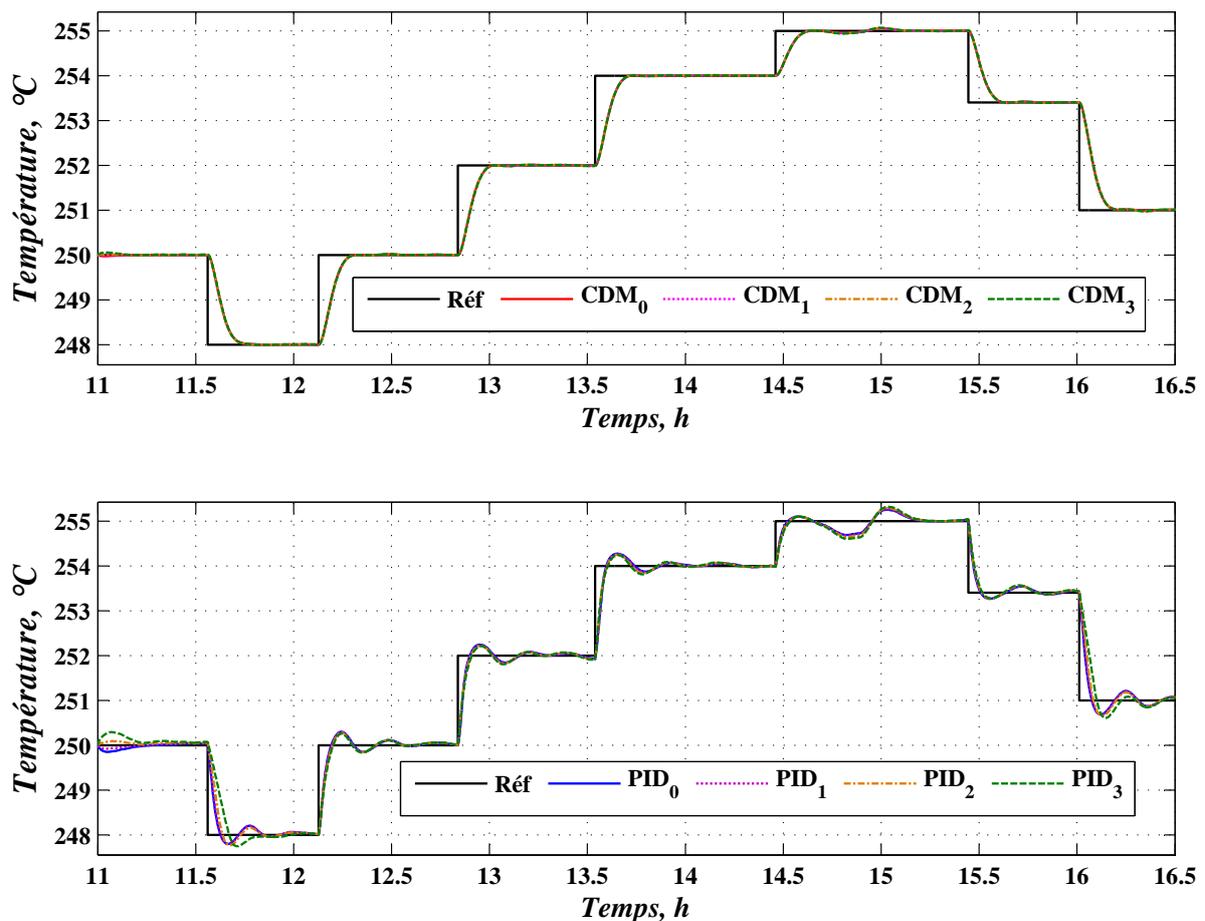


Figure 3.14: Test de robustesse pour la variation de la capacité calorifique

On remarque dans les deux figures 3.13 et 3.14 que la réponse du système contrôlé par le CDM est plus robuste que la réponse du système contrôlé par le PID. On ne voit presque aucun changement dans le cas du régulateur CDM pour les deux variations : densité du fluide et capacité calorifique.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode CDM pour synthétiser un régulateur performant et robuste pour contrôler la station solaire décrite par le système des équations aux dérivées partielles. L'application de la commande peut être considéré comme CDM-étendu. Une linéarisation du système a été faite autour d'un point de fonctionnement, puis, nous avons réduit l'ordre de la fonction de transfert pour faciliter la synthèse du régulateur.

En utilisant différents critères de performance, une comparaison a été faite entre les résultats de simulation de la commande CDM et PID. Puis, nous avons fait plusieurs tests pour évaluer la robustesse de la commande en imposant des variations paramétriques.

Les simulations et l'étude comparative montrent que la commande CDM a atteint

---

les résultats désirés. Le régulateur est robuste, et donne une réponse stable, sans dépassements et sans pic de perturbations.

# Chapitre IV

---

**Commande hybride à base du  
CDM**

# CHAPITRE 4

---

## COMMANDE HYBRIDE À BASE DU CDM

---

## 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, un régulateur synthétisé à base de la commande CDM a donné des bons résultats en contrôlant la température de sortie de la station solaire thermique. Le contrôleur a été synthétisé en utilisant un système d'équations aux dérivées partielle linéarisé autour d'un point de fonctionnement.

La variation quotidienne des irradiances solaires qui est la source primaire d'énergie, provoque des changements dans la dynamique du système qui mène à avoir plusieurs différents points de fonctionnement distincts. Par conséquent, il est difficile d'obtenir des bons performances sur tout le domaine de fonctionnement avec un seul contrôleur fixé.

Ainsi, une autre méthode en hybridant avec le CDM est proposée dans cette partie pour résoudre ce problème, en utilisant la logique floue.

## 4.2 Superviseur flou de commutation entre des contrôleurs CDM

Dans plusieurs travaux tels que [27], [28], Les auteurs ont développé une approche basée sur la logique floue pour commuter entre plusieurs régulateurs PID, ils l'ont appliqué à la même station solaire étudiée dans notre travail (ACUREX), le but des chercheurs était de résoudre le problème des effets causés par les variations des irradiances solaires rapides et inattendues, ou par la variation de la température d'entrée et les changements de la consigne.

Cette méthode peut être appliquée dans notre cas, en remplaçant les régulateur PID pas des régulateurs CDM. On va suivre des étapes pour déduire les contrôleurs de chaque point de fonctionnement, une seule possibilité pour implémenter un superviseur pour commuter entre ces différents contrôleurs c'est par la méthodologie de la logique floue et le superviseur est construit de type Takagi-Sugeno. Ainsi, le nombre de contrôleurs CDM à utiliser par le superviseur doit être réduit en utilisant la technique de *c-Means clustering*.

## 4.3 Méthodologie de commande

pour donner le modèle mathématique du problème, la dynamique du système solaire peut être représentée par un nombre de comportements caractéristiques  $M_1, M_2, \dots, M_N$ , tel que chaque  $M_i$  correspond à un modèle nominale ( ou une fonction de transfert)  $G_i$ . Ainsi, pour obtenir les performances désirées quand le système fonctionne sous les conditions  $M_i$ , il est nécessaire de synthétiser un contrôleur nominale  $C_i$  correspond à chaque  $G_i$ . La structure de commande par le superviseur flou de commutation entres les contrôleurs de CDM est donnée dans la figure 4.1.

Le superviseur flou est constitué de trois parties, La fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification, la première c'est l'opération de projection des variables physiques réelles (irradiances et température de référence) sur des ensembles flous

caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables, la deuxième étape est le mécanisme de décision qui permet de calculer les ensembles flous associés à la commande, puis la défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

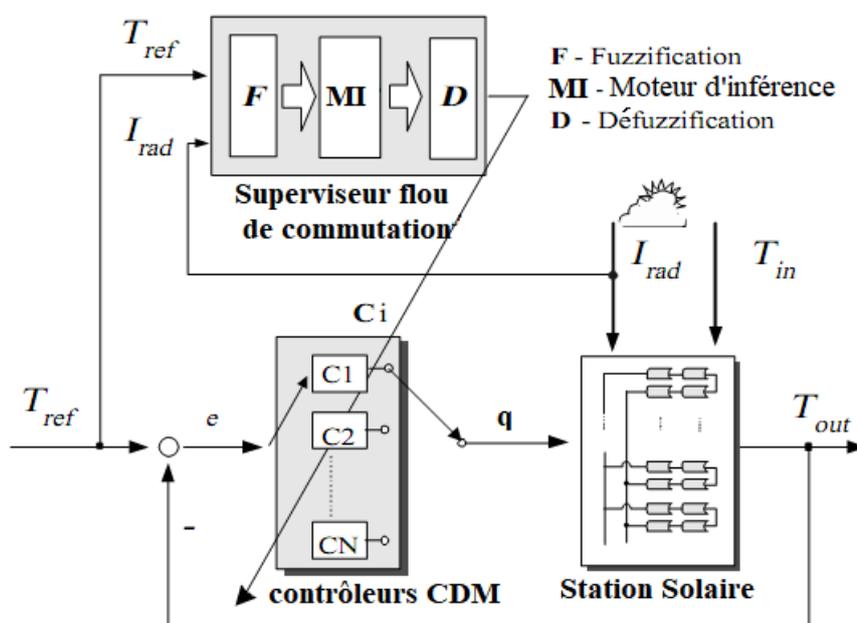


Figure 4.1: Schéma de commande par le superviseur flou de commutation entre les contrôleurs de CDM

### 4.3.1 Fuzzification

Les auteurs de [27] ont étudié la même station que nous étudions ici, ainsi pour faciliter le travail, on va prendre les mêmes données telles que les intervalles de variation de la température de référence  $T_{ref}$  et des irradiances solaires  $I_{rr}$ , qui soient comme suit :

$$T = [230 \text{ C}, 270 \text{ C}] \quad (4.1)$$

$$I = [600 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2] \quad (4.2)$$

Pour chaque variable, on donne cinq labels linguistiques :

$$\{TP, PT, NO, GR, TG\} = \{\text{Tres Petite, Petite, Normale, Grande, Tres Grande}\} \quad (4.3)$$

Les ensembles flous choisis pour les deux variables ; Les irradiances solaires et la température de référence soient :

$$SI = [I_{rr}, \mu_I(I_{rr}) \mid I_{rr} \in I] \quad (4.4)$$

$$ST = [T_{ref}, \mu_T(T_{ref}) \mid T_{ref} \in T] \quad (4.5)$$

Ainsi, les fonctions d'appartenances associés aux ensembles flous choisis sont considérées de type triangulaire, ils sont montrés aux figures 4.2 et 4.3.

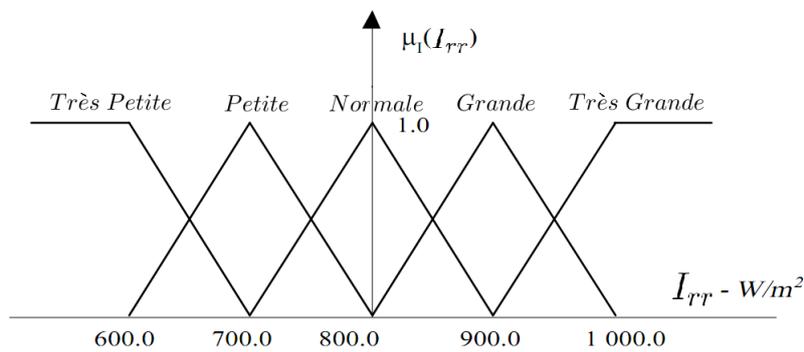


Figure 4.2: Fonction d'appartenance des irradiations solaires

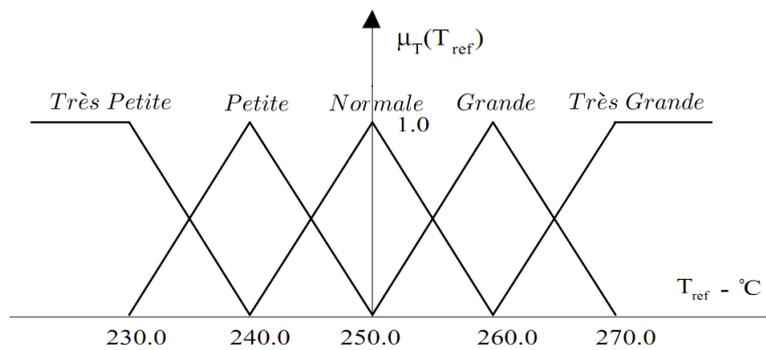


Figure 4.3: Fonction d'appartenance de la température de référence

### 4.3.2 Moteur d'inférence

La base de règles qui définit la stratégie de commutation entre les contrôleurs CDM est donnée à la figure 4.4 :

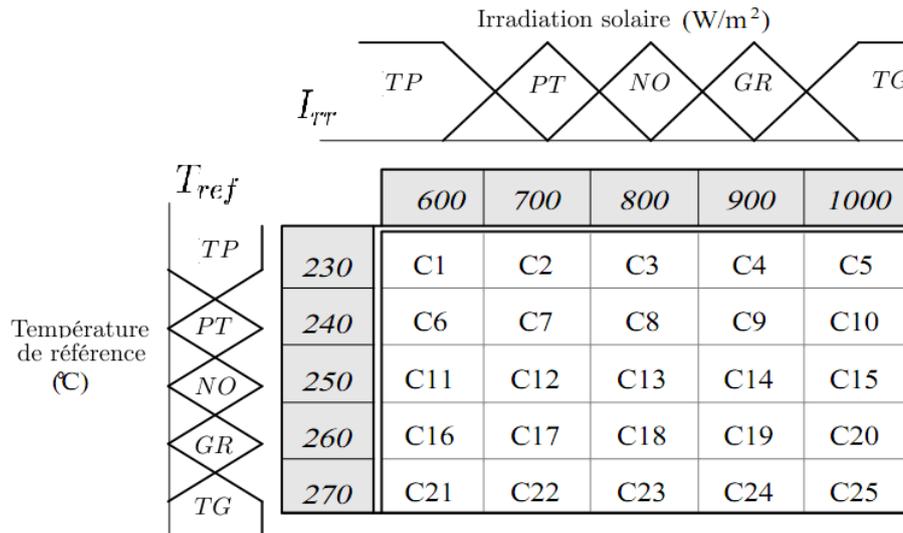


Figure 4.4: Base de règle du superviseur de commutation

Les entrées supposées à caractériser les conditions nominales de la station solaire, sont Les irradiations solaires et la température de référence. Les sorties sont des  $C_i$ , avec  $i = 1, 2, \dots, 25$  c'est l'index qui identifie le contrôleur sélectionné.

En générale, un système flou de Takagi-Sugeno est décrit par la base de règle (4.6), Où X est Y sont les labels linguistiques,  $\varphi$  c'est une fonction non-linéaire quelconque et  $x$ ,  $y$ , et  $z$  sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande.

$$R_i : Si (x \text{ est } X) \text{ ET } (y \text{ est } Y) \text{ ALORS } z = \varphi(x, y) \quad (4.6)$$

Ainsi, la base de règles du superviseur flou de commutation montrée à la figure 4.4 peut être transformée en un type de Takagi-Sugeno (4.7) :

$$R_i : Si (I_{rr} \text{ est } SI^{(i)}) \text{ ET } (T_{ref} \text{ est } ST^{(i)}) \text{ ALORS } \alpha_i = \mu_I^{(i)}(I_{rr}) * \mu_T^{(i)}(T_{ref}) \quad (4.7)$$

où  $i = 1, 2, \dots, 25$ ,  $SI^{(i)}$  et  $ST^{(i)}$  sont les labels linguistiques des variables  $I_{rr}$  et  $T_{ref}$  respectivement pour la  $i^{eme}$  règle. Les variables  $\mu_I^{(i)}(I_{rr})$  et  $\mu_T^{(i)}(T_{ref})$  sont les degrés d'appartenance respectif.

### 4.3.3 Agrégation des règles

Ensuite, pour agréger les règles, on utilise l'opérateur *Max* pour déterminer le contrôleur à sélectionner, tel que :

$$\alpha_i = \alpha_{max} = Max\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{25}\} \quad (4.8)$$

## 4.4 Synthèse du contrôleurs CDM

Pour la synthèse des contrôleurs à base de la méthode du diagramme de coefficients, on refait les mêmes étapes vues au chapitre 3, on aura dans ce cas 25 comportements basés sur des conditions sur  $I_{rr}$  et  $T_{ref}$ , ainsi, 25 modèles avec 25 fonctions de transfert  $G(s)_i$  obtenus par la linéarisation autour des points de fonctionnement, et réduits par la fonction *modred* pour trouver les fonctions  $G_{r_i}$  :

$$G_{r_i}(s) = \frac{N_i(s)}{D_i(s)}, \quad i = 1, 2, \dots, 25 \quad (4.9)$$

Les fonctions de transfert réduits  $G_{r_i}$  seront utiliser pour synthétiser les régulateurs CDM  $C_i$  via la forme de Sylvester pour trouver les polynômes  $A_i(s)$ ,  $B_i(s)$  et  $F_i(s)$  correspondants à chaque modèle.

### 4.4.1 Fonction de regroupement : *c-Means Clustering*

Le nombre de contrôleurs synthétisés à la partie précédente, peut être réduit par un regroupement en utilisant l'algorithme *c - Means clustering* [29] (c-moyennes regroupement). Généralement, le but de ce regroupement est de classifier un ensemble de données connus dans des groupes de données homogènes. Ainsi, l'algorithme de *c-Means clustering* est appliquée ici pour grouper les contrôleurs ayant des paramètres possédant les mêmes valeurs.

L'ensemble des données à classifier, c'est qui contient les paramètres des contrôleurs CDM nominaux ( $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 25$ ), on considère 7 groupes (clusters), et en appliquant la fonction de regroupement en Matlab *fcm* (*Fuzzy C - meansclustering*, la simulation des résultats vue au figure 4.6), on déduit la base de règles finale, montrée dans la figure 4.5 :

		Irradiation solaire ( $W/m^2$ )				
		600	700	800	900	1000
Température de référence ( $^{\circ}C$ )	230	<b>C5</b>	<b>C5</b>	<b>C2</b>	C6	C6
	240	<b>C5</b>	C1	<b>C5</b>	C2	C2
	250	C7	<b>C5</b>	C1	C4	C2
	260	C7	C2	C4	<b>C3</b>	C4
	270	C6	C7	C1	C4	<b>C3</b>

Figure 4.5: Base de règles simplifiée du superviseur de commutation

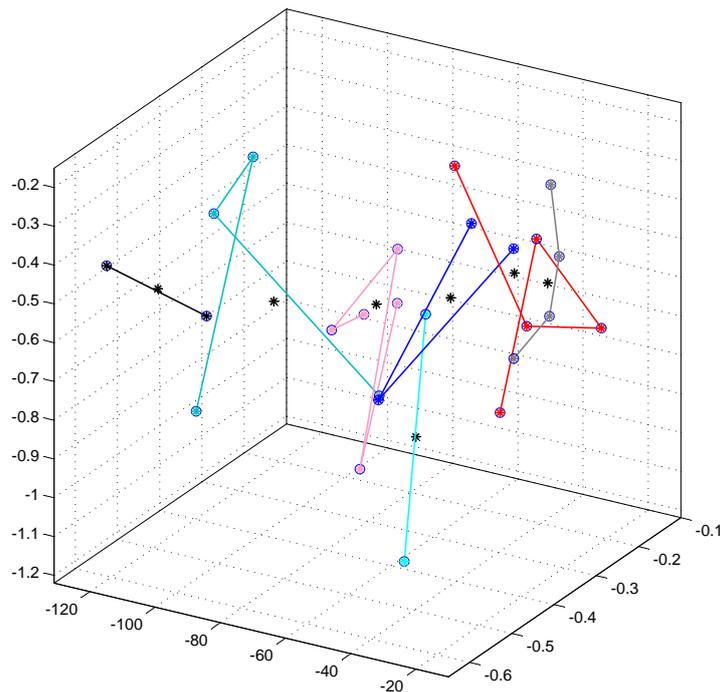


Figure 4.6: Regroupement des contrôleurs CDM (o = contrôleurs initiaux, \* = contrôleurs finals)

## 4.5 Résultats de simulation

Dans cette partie, on utilise les profils des variables vus aux figures Fig. 2.13, Fig. 2.14 et Fig. 2.15. On va commander la station par des contrôleurs de CDM à l'aide du superviseur flou pour commuter entre les 7 régulateurs selon la variation de température de référence et la variation des irradiances solaires.

Les 7 régulateurs sont déduits par le regroupement des 25 contrôleurs en utilisant la fonction *fcm* dans Matlab, en linéarisant d'abord le système autour des 25 points de fonctionnement, déduits du tableau de la base de règles dans la Figure 4.4.

Une autre simulation est faite avec le contrôleur synthétisé au chapitre 3, il sera appliqué pour commander le système sous les mêmes conditions avec les mêmes profils des variables utilisés dans cette partie, cela est pour évaluer les performances du contrôleur hors le domaine de fonctionnement.

Le résultat de simulation en commandant avec un seul contrôleur est montrée dans la figure 4.7, il est clair que les bonnes performances sont données autour du point de fonctionnement pour une température de sortie 250 °C. Par contre, il ne peut pas assurer la poursuite de référence et la robustesse contre les variations paramétriques hors le domaine de fonctionnement.

C'est pour cela on applique l'autre système de commande basé sur la logique floue, en commutant entre les 7 régulateurs, le résultat est montrée dans la figure 4.8, ça donne de bonnes performances, il assure la poursuite de références, et des temps de réponses désirés, sans dépassements ou pics de perturbation, avec une robustesse contre les variations des irradiances et des autres variables.

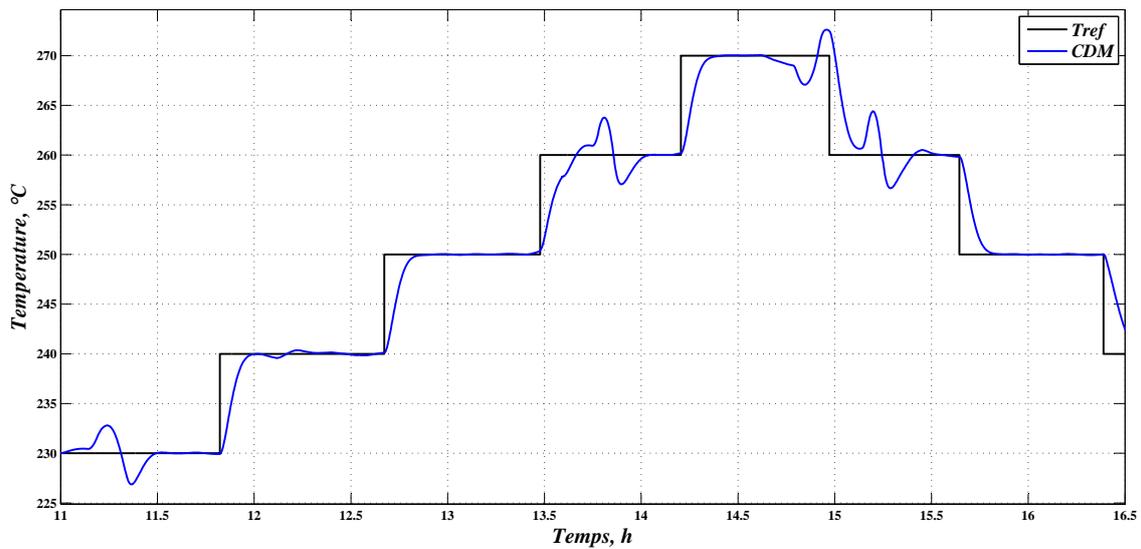


Figure 4.7: Réponse du système commandé avec un seul contrôleur

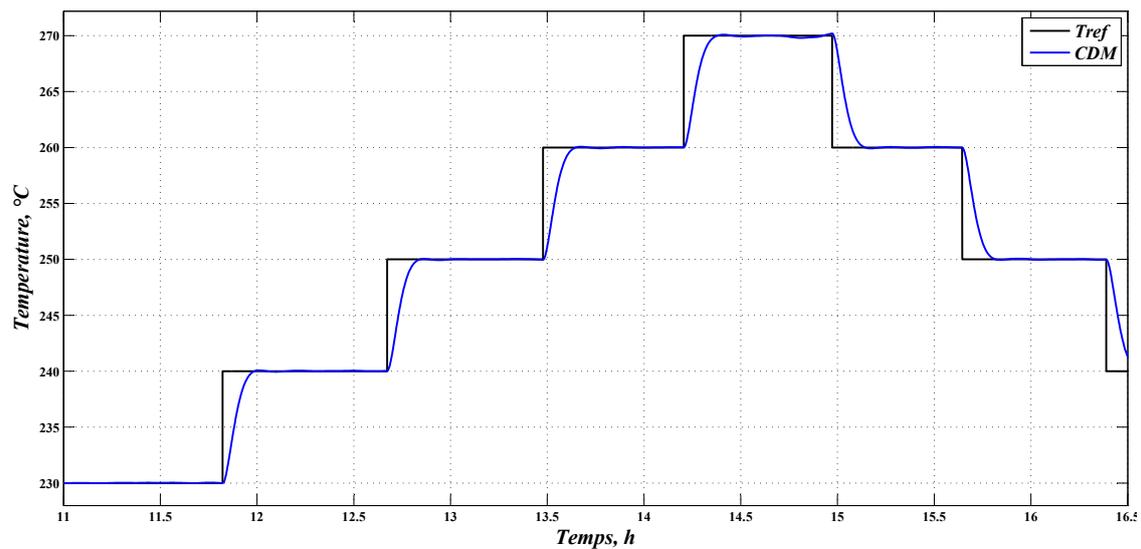


Figure 4.8: Réponse du système commandé par la commande hybride

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une commande hybride, basée sur la logique floue, en commutant entre des contrôleurs CDM par un superviseur flou, les contrôleurs CDM sont synthétisés autour des points de fonctionnement, puis leur nombre est réduit par la fonction de regroupement (*clustering*). Le superviseur est construit de type Takagi-Sugeno, la méthodologie de la logique floue est suivie étape par étape. Pour évaluer le système de commande hybride, nous avons donné une simulation avec plusieurs variations dans la consigne de température et dans les irradiances solaires, en comparant avec les résultats d'un système commandé par un seul

---

régulateur. La commande hybride développée dans cette partie a donné des bonnes performances, elle assure les résultats désirés dans tous les domaines de fonctionnement.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

PAR ce travail, nous estimons avoir contribué au développement d'une nouvelle approche qui s'appelle : méthode du diagramme de coefficients (CDM), c'est une approche algébrique, robuste vis à vis des perturbations et des variations paramétrique, développée pour les systèmes non linéaires incertains. La commande a donnée de bons résultats dans plusieurs travaux, et dans le cadre de ce travail, on l'applique à une centrale solaire thermique.

Les collecteurs creux cylindro-paraboliques étudiés dans ce travail sont les concentrateurs les plus utilisés pour la concentration des irradiances dans les systèmes solaires thermiques, ils sont plus simples et donnent de meilleurs rendements ; on s'intéresse à la Plateforme solaire d'Almeria (PSA) en Espagne (ACUREX). La centrale est considérée comme un système non linéaire et est représentée par un système de deux équations aux dérivées partielles (EDP) qui contiennent des paramètres variants suivant la variations des températures du fluide.

Sur le thème commande, la méthode du diagramme de coefficients a été développée pour construire un système de commande robuste et stable, à appliquer aux systèmes industriels dans la pratique pour remplacer les régulateurs conventionnels tels que le PID, qui est largement utilisé dans l'industrie avec un pourcentage de 95 %. Cependant, ces régulateurs traditionnels ne peuvent pas être très performants, ils ne peuvent pas éviter quelques contraintes telles que les effets non-linéaires inattendus produits par la saturation, la limite supérieure de magnitude du signal de commande ou autres. Le CDM a été développée pour être appliqué sur la station en tant que CDM-étendu, nous contribuons à l'amélioration de la précision du contrôleur, en prenant les deux équations qui représentent les variations thermiques du fluide et du métal, et en prenant aussi en considération les variations paramétriques en fonction des températures telles que les variations des capacités calorifiques et les densités.

Plusieurs étapes ont été suivies pour la synthèse du régulateur, autour d'un point de fonctionnement, après la linéarisation du système et l'obtention de sa fonction de transfert ainsi que la réduction de son ordre. Nous avons adopté les meilleurs indices de stabilité pour la CDM suivant les travaux de Manabe. Ce régulateur a prouvé des bonnes performances et prouvé sa robustesse dans un domaine de fonctionnement, on commande la température de sortie pour suivre des valeurs de consignes et pour l'y maintenir.

---

Ensuite, pour garantir les bonnes performances dans tous les domaines de fonctionnement, nous avons proposé un autre système de commande, basé sur un superviseur flou, pour commuter entre plusieurs régulateurs synthétisés par la méthode CDM sur les différents points de fonctionnement, le superviseur est construit de type Takagi-Sugeno, avec une base de règle comportant 25 contrôleurs, leur nombre est réduit par la suite en 7 contrôleurs en utilisant la fonction de regroupement, ça nous donnait un système de commande hybride qui est robuste, et donne des réponses stables, sans dépassement et sans pic de perturbations, tout en respectant le temps de montée spécifié.

Enfin, nous terminons ces travaux par la présentation d'axes de recherche très intéressants qui peuvent améliorer la méthode proposée, et peuvent faire d'objet d'investigation dans le futur :

- L'observation des paramètres non mesurables tels que les températures des segments dans le tube.
- L'amélioration de la méthode CDM pour avoir un bon temps de réponse, ou par l'association d'autres commandes.
- L'implémentation pratique des algorithmes proposés.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. F. AVSAR and M. T. Soylemez. Optimizing cdm controllers under control signal constraints. *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, IEEE*, (2012).
- [2] K. Kalpana and B. Meenakshipriya. Design of coefficient diagram method (cdm) based pid controller for double integrating unstable system. *2nd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), IEEE*, (2014).
- [3] S. Manabe. Importance of coefficient diagram in polynomial method. *Proceedings of the 42nd IEEE, Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA*, (2003), 3489-3494.
- [4] S. Manabe. Brief tutorial and survey of coefficient diagram method. *The 4th Asian Control Conference, Singapore*, (2002), 1161-1166.
- [5] S. Bhusnur and S. Ray. A novel robust control strategy for interval plants using the two loop mfc and cdm. *4th International Workshop on Reliable Engineering Computin, National University of Singapore*, (2010), 665-683.
- [6] S.E. Hamamci and M. Koksals. Robust control of a dc motor by coefficient diagram method. *Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrownik, Chorwacja*, (2001).
- [7] E. F. Camacho and A. J. Gallego. Model predictive control in solar trough plants : A review. *International Federation of Automatic Control (IFAC)*, 48(23), (2015), 278-285.
- [8] S. Elmetennani and T.M. Laleg-Kirati. Bilinear reduced order approximate model of parabolic distributed solar collectors. *Solar Energy*, 131, (2016), 71-80.
- [9] E. F. Camacho, F. R. Rubio, and F. M. Hughes. Self-tuning control of a solar power plant with a distributes collector field. *IEEE Control Systems*, (1992), 72-78.

- 
- [10] E. F. Camacho and E. Berenguel. Robust adaptive model predictive control of a solar plant with bounded uncertainties. *International Journal of Adaptive Control and Signal processing*, 11(4), (1997), 311-325.
- [11] R. N. Silva, L. M. Rato, L. M. Barao, and J. M. Lemos. A physical model based approach to distributed collector solar field control. *Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK*, (2002), 3817-3822.
- [12] F. R. Rubio, M. Berenguel, and E. F. Camacho. Fuzzy logic control of a solar power plant. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 3(4), (1995), 459-468.
- [13] E. F. Camacho and A. J. Gallego. Estimation of effective solar irradiation using an unscented kalman filter in a parabolic-trough field. *Solar Energy*, 86, (2012), 3512-3518.
- [14] H. KIM. The study of control design method. *Korea-Russia International Symposium On Science and Technology, KORUS, IEEE*, (2004).
- [15] R. Hirokawa, K. Sato, and S. Manabe. Autopilot design for a missile with reaction-jet using coefficient diagram method. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada*, (2001).
- [16] F. Haouari, B. Nourdine, M. S. Boucherit, and M. Tadjine. A coefficient diagram method controller with backstepping methodology for robotics manipulators. *Journal of Electrical Engineering*, 66(5), (2015), 270-276.
- [17] S. Manabe. Sufficient condition for stability and instability by lipatov and its application to the coefficient diagram method. *9th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS, Sagamihara*, (1999), 440-449.
- [18] R. Ali, T. H. Mohamed, Y. S. Qudaih, and Y. Mitani. A new load frequency control approach in an isolated small power systems using coefficient diagram method. *Electrical Power and Energy Systems*, 56, (2014), 110-116.
- [19] M. Z. Bernard, T. H. Mohamed, Y. S. Qudaih, and Y. Mitani. Decentralized load frequency control in an interconnected power system using coefficient diagram method. *Electrical Power and Energy Systems*, 63, (2014), 165-172.
- [20] P. Garasi, Y. Qudaih, R. Ali, M. Watanabe, and Y. Mitani. Coefficient diagram method based load frequency control for a modern power system. *Journal Of Electronic Science And Technology*, 12(3), (2014), 270-276.
- [21] S. Manabe. Coefficient diagram method as applied to the attitude control of controlled-bias-momentum satellite. *13th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospac, Palo Alto, California, USA*, (1994), 322-327.
- [22] S. Manabe. Application of coefficient diagram method to mimo design in aerospace. *15th Triennial Worldd Congress IFAC, Barcelona, Spain*, (2002).

- 
- [23] E. F. Camacho, M. Berenguel, and A. J. Gallego. Control of thermal solar energy plants. *Journal of Procsee Control*, 24, (2014), 332-340.
- [24] C. Brosilow and B. Joesph. *Techniques of Model-Based Control*. (2002).
- [25] H. Ammar, M. T. Bouziane, and Y. Bakelli. Influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire. *Revue des energies renouvelables SIENR'12 Ghardaia*, 12, (2012), 23-28.
- [26] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio, and D. Martinez. Advanced control of solar thermal, control of solar energy systems. *Springer, London Dordrecht Heidelberg, New York*, (2012).
- [27] J. Henriques, A. Cardoso, and A. Duoardo. Supervision and c-means clustering of pid controllers for a solar power plant. *International Journal of Approximate Reasoning*, 22, (1999), 73-91.
- [28] A. L. Cardoso, J. Henriques, and A. Duoardo. Fuzzy supervisor and feedforward control of a solar power plant using accessible disturbances. *European Control Conference (ECC), Germany*, (1999), 1711-1716.
- [29] J. Bezdek. Pattern recognition with fuzzy objective functions algorithms. *Plenum, N. York*, (1981).
- [30] M. Koksall and S. E. Hamamci. A program for the design of linear time invariant control systems : Cdmcad. *Computer Application and Engeneering Education*, 12, (2004), 165-174.
- [31] O. Ocal, M.T Soylemez, and A. Bir. Robust controller tuning based on coefficient diagram method. *Proceedings of International Conference on Control, Manchester, UK*, (2008).
- [32] W. Giernacki. Robust adaptive control with the use of dacdm algorithm – impact of settings on tracking quality. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(3), (2015), 210-215.
- [33] O. Ocal, A. Bir, and B. Tibken. Digital design of coefficient diagram method. *American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA*, (2009), 2849-2854.
- [34] H. Kim. The study of control design method. *IEEE, Information Technology, KORUS*, (2004), 55-58.
- [35] Z. Fenchouche, O. Benzineb, M. S. Boucherit, and M. Tadjine. Control of cylindrical parabolic soalr concentrators based on coefficient diagram method (cdm). *10th conference on electrical engineering at ecole militaire polytechnique EMP, Algeria, CGE'10*, (2017).
- [36] J. Guo, X. Huai, and Z. Liu. Performance investigation of parabolic trough solar receiver. *Applied Thermal Engineering journal*, 95, (2016), 357-364.

- 
- [37] A.J. Gallego and E.F. Camacho. Adaptive state-space model predictive control of a parabolic-trough field. *Control Engineering Practice*, 20, (2012), 904-911.
- [38] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part ii : Advanced control approaches. *Solar Energy*, 81, (2007), 1252-1272.
- [39] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part i : Modeling and basic control approaches. *Solar Energy*, 81, (2007), 1240-1251.
- [40] T. Benjanarasuth, D. Kumanya, N. Komine, and J. Ngamwiwit. Ffc incorporating pi controller designed by cdm for temperature control systems. *IEEE ICIT02, Bangkok, THAILAND*, (2002), 540-544.
- [41] D. Limon, I. Alvarado, T. Alamo, and M. Ruiz. 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*, (2008), 958-963.
- [42] A.A. Boichuk and V.F. Zhuravlev. Solvability criterion for integro-differential equations with degenerate kernel in banach spaces. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 18(4), (2018), 331-341.
- [43] N. Fallo and R.J. Moitsheki. Approximate analytical solutions for transient heat transfer in two-dimensional straight fins. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 19(1-SI), (2019), 133-140.
- [44] E. F. Camacho and A. J. Gallego. Optimal operation in solar trough plants : A case study. *Solar Energy*, 95, (2013), 106-117.
- [45] Z. Fenchouche, M. Chakir, O. Benzineb, M. S. Boucherit, and M. Tadjine. Robust controller design for solar plant using extended coefficient diagram method (cdm) incorporating pid. *6th International Conference on systems and control (ICSC), Batna, Algeria*, (2017), 348-353.
- [46] Z. Fenchouche, M. Chakir, O. Benzineb, M. S. Boucherit, and M. Tadjine. Control design for non-linear uncertain systems via coefficient diagram method : Application to solar thermal cylindrical parabolic trough concentrators. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 20(1), (2020), 21-37.
- [47] C. Cirre, L. Valenzuela, M. Berenguel, and E. F. Camacho. Feedback linearization control for a distributed solar collector field. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), (2005), 356-361.
- [48] D. Limon, I. Alvarado, T. Alamo, M. Ruiz, and 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*, (2008), 958-963.

- 
- [49] P.V. Gopi Krishna Rao, M. V. Subramanyam, and K. Satyaprasad. Study on pid controller design and performance based on tuning techniques. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, (2014), 1411-1417.
- [50] C. A. Mosbah, M. Tadjine, M. Chakir, and M. S. Boucherit. On the control of parabolic solar collector : The zipper approach. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), (2016), 1100-1108.
- [51] A. L. Cardoso, J. Henriques, and A. Douardo. Fuzzy supervisor and feedforward control of a solar power plant using accessible disturbances. *European Control Conference (ECC), IEEE*, (1999).

# ANNEXE A

## MATRICES DU SYSTÈME

### Matrices du système linéaire : $A_F$ , B et C

Les trois matrices du système linéaire,  $A_F$ , B et C sont données en fonctions des éléments  $a_{i,j}$  et  $b_i$ , un exemple des ces matrices est donnée par la suite, elles sont correspondantes au point de fonctionnement pris pour l'application dans la partie simulation.

$$A_F = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & \cdots & 0 & a_{1,\frac{n}{2}+1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{2,2} & a_{2,3} & & 0 & 0 & a_{2,\frac{n}{2}+2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{\frac{n}{2}-1,\frac{n}{2}-1} & a_{\frac{n}{2}-1,\frac{n}{2}} & 0 & \cdots & 0 & a_{\frac{n}{2}-1,n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{\frac{n}{2},\frac{n}{2}} & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{\frac{n}{2},n} \\ a_{\frac{n}{2}+1,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{\frac{n}{2}+1,\frac{n}{2}+1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{\frac{n}{2}+2,2} & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{\frac{n}{2}+2,\frac{n}{2}+2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{n-1,\frac{n}{2}-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{n,\frac{n}{2}} & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

$$B = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_{\frac{n}{2}-1} \ b_{\frac{n}{2}} \ b_{\frac{n}{2}+1} \ b_{\frac{n}{2}+2} \ \cdots \ b_{n-1} \ b_n]^T$$

$$C = [1 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]^T$$

---

## Matrices du système linéaire autour du point de fonctionnement $P_0$

$$A_F = \begin{pmatrix} -0.1011 & 0.0357 & 0 & \cdots & 0 & 0.0653 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -0.10112 & 0.0357 & & 0 & 0 & 0.0654 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -0.0949 & 0.0357 & 0 & \cdots & 0 & 0.0606 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & -0.0932 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0.0591 \\ 0.0476 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -0.048 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0.0477 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -0.048 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0.0419 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -0.0432 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0.0405 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -0.0421 \end{pmatrix}$$

$$B = [ 146.714 \quad 147.5719 \quad \cdots \quad 159.2422 \quad 494.4258 \quad -332.6778 \quad -333.99 \quad \cdots \quad -350.26 \quad -351.69 ]^T$$

## ANNEXE B

### LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

- **Z. Fenchouche**, M. Chakir, O. Benzineb, M. S. Boucherit, and M. Tadjine, "Robust Controller Design for Solar Plant Using Extended Coefficient Diagram Method (CDM) Incorporating PID", Proceedings of the 6th International Conference on Systems and Control, University of Batna 2, Batna, Algeria, May 7-9, 2017.
- **Z. Fenchouche**, O. Benzineb, M. S. Boucherit, and M. Tadjine, "Control of Cylindrical Parabolic Solar Concentrators Based on Coefficient Diagram Method (CDM)", CGE'10 EMP, ALGERIE, 17-18 AVRIL, 2017.
- **Z. Fenchouche**, M. Chakir , O. Benzineb, M.S. BOUCHERIT, M. Tadjine, " Control Design for Non-linear Uncertain Systems via Coefficient Diagram Method : Application to Solar Thermal Cylindrical Parabolic Trough Concentrators ", Nonlinear Dynamics and Systems Theory, 20(1), (2020), 21-37.