

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR DE DJELFA

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et Technologie



Mémoire de Magister

en Génie électrique

Option : Automatique Avancée

Présenté par :

BOUDJANA Saïd

Ingénieur d'état en électronique

Thème

Modélisation et commande d'un système solaire pour le chauffage d'eau

Soutenu publiquement le : 09 / 04 / 2015, devant le jury composé de :

- | | | |
|-----------------|--|--------------|
| - K.GUESMI | Professeur à l'U. de Djelfa | Président |
| - M.TADJINE | Professeur à l'ENP d'Alger | Rapporteur |
| - M.S.BOUCHERIT | Professeur à l'ENP d'Alger | Rapporteur |
| - O.BENZINEB | Maître de Conférences à l'U. de Blida | Examineur |
| - D. DJOUDI | Maître de Conférences à l'U. de Djelfa | Examinatrice |

Année universitaire : 2014/2015

ملخص

إن استخدام سخانات شمسية للمياه في العديد من المشاريع السكنية والمؤسسات التجارية و الصناعية... يتطلب قدرا من التحكم في درجة الحرارة، لتوفير الطاقة والحفاظ على درجة الحرارة المطلوبة. كان ولا يزال التحكم في السخانات الشمسية الجماعية يتم دائما بطريقة بسيطة (كل شيء أو لا شيء)، حيث يتم إهدار طاقة كبيرة أثناء التحكم كما يتم إهمال السلوك الديناميكي للنظام الشمسي. وفي هذا الصدد، و لتطوير التحكم لهذا النموذج أخذنا بعين الاعتبار سلوك متغيرات هذا الأخير، لهذا تم أولا وضع نموذج رياضي لا خطي للتحكم في التغير الحراري للنظام، ثم طرح تقنية تحكم قوية، والتي تأخذ في الاعتبار القوى المحركة لمتغيرات النظام، وذلك باستخدام تقنيات التحكم القوية و التي لا تتأثر بالاضطرابات الحاصلة في الإشعاعات الشمسية، مثل التحكم التنبؤي المعمم و التحكم الانزلاقي من أجل تحقيق الهدف.

كلمات مفتاحية: السخانات الشمسية، التحكم في الطاقة الشمسية، التحكم التنبؤي المعمم، التحكم الانزلاقي.

Abstract

The use of solar water heaters in many residential, commercial, institutional ... requires a temperature control, to save energy and keep the water temperature at a given value.

The control of the solar water heater is always done in a simple way (off or on), where the system dynamic behavior is not taken into account . In this regard, it is proposed to develop a robust command that takes into account the dynamics of the system variable. For this purpose, a mathematical model governing the thermal behavior of the system is established, and a robust control which takes into account the dynamics of the system variable is developed . To achieve our goal, predictive robust control techniques and sliding mode control are used.

Keywords: water heating system, solar power, robust control, solar thermal, generalized predictive control, sliding mode control.

Résumé

L'application la plus simple et la plus immédiate de l'énergie solaire, est la production d'eau chaude à usage domestique. L'utilisation du chauffe-eau solaire dans des nombreux établissements résidentiels, commerciaux, institutionnels... nécessite, une régulation de la température, pour économiser l'énergie et garder la température de l'eau à une valeur donnée.

La commande du chauffe-eau solaire est toujours faite d'une manière simple (tout ou rien) où on néglige le comportement dynamiques du système. Dans ce sujet, on propose de développer une commande robuste qui prend en considération la dynamique variable du système. A cet effet, un nouveau modèle mathématique régissant le comportement thermique du système est établi ainsi que le développement d'une commande robuste qui prend en considération la dynamique variable du système proposé. Les techniques de commande robuste prédictive et la commande par mode de glissement sont utilisées pour atteindre notre objectif.

Mots Clés: système de chauffage d'eau, énergie solaire, commande robuste, solaire thermique, commande prédictive généralisée, commande par mode de glissement.

Remerciements

Ce mémoire a été préparé au sein de l'UDES EPST/CDER Bou-Ismaïl (Tipaza). Pour cela je tiens à remercier le directeur de l'UDES ainsi que mes responsables hiérarchiques pour leurs aides et compréhension.

J'adresse également mes plus sincères remerciements tout en exprimant ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur TADJINE Mohamed, professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger, qui m'a fait confiance et guidé le long de ce travail en me donnant des conseils très précieux pour mener ce travail à bien et à terme.

Je remercie aussi Monsieur BOUCHERIT Mohamed Seghir, professeur à l'école nationale polytechnique d'El Harrach d'Alger, pour tous ces encouragements continus ainsi que pour ces conseils bien utiles ainsi que pour la précieuse documentation.

De même, je tiens à remercier très profondément Monsieur Kamel GUESMI, Professeur à l'université de Djelfa et le responsable du poste de graduation de la promotion automatique avancée

Je tiens à remercier aussi, DJOUDI Dalila, Maître de conférences à l'université de Djelfa pour sa participation au jury de ce présent mémoire en tant qu'examinatrice ainsi que BENZINEB Omar, Maître de conférences à l'université de Blida pour sa participation au jury de soutenance de ce présent mémoire en tant qu'examineur.

Enfin, mes remerciements vont à toutes les personnes ayant contribué et à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin, directement ou indirectement, continue ou ponctuelle, à l'achèvement de ce travail.

Saïd BOUDJANA.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents ;

*A ma femme qui m'a beaucoup soutenu pendant l'accomplissement
de cette étude;*

A mes enfants ;

A mon frère, mes sœurs et toute ma famille ;

A mes enseignants.

A mes collègues de l'UDES.

A tous ceux qui aiment la recherche scientifique et la soutiennent.

Saïd BOUDJANA.

Sommaire

Introduction générale	01
 Chapitre I: Rayonnement et énergie solaire thermique	
I.1 Introduction	05
I.2 Le rayonnement solaire	05
I.2.1 Le rayonnement solaire extraterrestre	06
I.2.2 Le rayonnement solaire terrestre	07
I.2.3 Constante solaire	07
I.3 Énergie solaire	08
I.3.1 Énergie solaire photovoltaïque	08
I.3.2 Énergie solaire thermique	09
I.4 Capteurs Solaires thermiques	10
I.4.1 Capteurs solaires thermiques fixes	10
I.4.1.1 Capteurs plans	11
I.4.1.2 Capteurs paraboliques composés (CPC)	11
I.4.1.3 Capteurs sous vide	12
I.4.2 Capteurs solaires thermiques mobiles	12
I.4.2.1. Capteurs cylindro-paraboliques	12
I.4.2.2. Miroirs Fresnel	13
I.4.2.3. Capteurs paraboliques à moteur Stirling	13
I.4.2.4. Tour solaire	14
I.5 Chauffe-eau solaire	15
I.5.1 Thermosiphon	15
I.5.2 Circulation forcée	16
I.6 Rappel sur les modes de transferts thermiques	17
I.6.1 Modes de transfert de la chaleur	17
I.6.1.1 Transfert de chaleur par conduction	17
I.6.1.2 Transfert de chaleur par convection	18
I.6.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement	18
I.6.2 Corps noir	18
I.7 Conclusion	18

Chapitre II : Modélisation et linéarisation d'un système solaire thermique

II.1	Introduction	20
II.2	Modélisation d'un système solaire thermique	20
II.2.1	Modèle à paramètres regroupés	20
II.2.2	Modèle bilinéaire	20
II.2.3	Modèle à paramètres distribués	21
II.3	Model Mathématique Du Chauffe-eau Solaire	22
II.3.2	Modèle mathématique du capteur solaire	23
II.3.3	Modèle mathématique de l'échangeur	25
II.3.4	Modèle mathématique de la cuve de stockage	26
II.4	Linéarisation du modèle non linéaire du système de chauffe-eau solaire	28
II.4.1	Points d'équilibres	28
II.4.2	Linéarisation	28
II.6	Simulation et Résultats	31
II.6.1	Simulation en boucle ouverte	31
II.6.2	Simulation de la commande PI du chauffe-eau solaire	33
II.7	Conclusion	34

Chapitre III : Commande prédictive du chauffe-eau solaire

III.1	Introduction	36
III.2	Bref historique de la commande prédictive dans le domaine de solaire thermique	36
III.3	Principe de la commande prédictive	37
III.4	Eléments de la commande prédictive	38
III.4.1	Modèle du système	38
III.4.2	Horizon glissant	38
III.4.3	Fonction du coût	39
III.4.4	Contraintes	40
III.4.5	Prédiction	40
III.5	La commande prédictive généralisée (GPC)	42
III.5.1	Modèle GPC	42
III.5.2	Prédicteur optimal	43
III.5.3	Fonction du coût	44
III.5.4	Contraintes	45

III.6 Simulation et résultats	46
III.6.1 Simulation avec contrainte négative	46
III.6.2 Simulation avec contraintes positives	48
III.6.3 Influence de l'horizon de commande (N_c)	49
III.6.4 Test de robustesse	50
III.6.4.1 Robustesse par rapport à la perturbation	50
III.6.4.2 Robustesse par rapport à la variation paramétrique	51
III.6.5 Effet de la variation de la perturbation de charge	52
III.7 Conclusion	53

Chapitre IV: Commande par Mode de Glissement du chauffe-eau solaire

IV.1 Introduction	55
IV.2 Bref historique de la commande par mode de glissement	55
IV.3 Structures de base	56
IV.3.1 Structure par commutation d'une contre réaction d'état	56
IV.3.2 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande	57
IV.3.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec rajout de la commande équivalente	57
IV.4 Principe de la commande par mode de glissement	58
IV.5 Concepts de base	59
IV.5.1 Choix de la surface de glissement	59
IV.5.2 Condition de convergence et d'existence	60
IV.5.3 Calcul de la commande	61
IV.6 Broutement (Chattering)	62
IV.7 Application de la commande par mode de glissement au chauffe-eau solaire	63
IV.8 Simulation et résultats	65
IV.8.1 Simulation sans contraintes	65
IV.8.2 Simulation avec contraintes	66
IV.8.3 Etude de la robustesse	67
IV.8.3.1 Robustesse par rapport aux perturbations	67
IV.8.3.2 Robustesse par rapport aux variations paramétriques	69
IV.8.4 Effet de la variation de la perturbation de charge	69
IV.9 Conclusion	70

Chapitre V : Etude comparative

V.1 Introduction	72
V.2 Teste de performances	72
V.2.1 Commande PI	73
V.2.2 Commande GPC	74
V.2.3 Commande par mode de glissement	75
V.3 Comparaison energetique des trois commandes	77
V.4 Conclusion	78
Conclusion générale	79
Références bibliographiques	82

Liste des figures

Chapitre 1

Fig. 1. 1	Spectre solaire	05
Fig. 1. 2	Spectre du rayonnement solaire extraterrestre	06
Fig. 1. 3	Spectre du rayonnement Solaire terrestre	07
Fig. 1. 4	Schéma synoptique Energie Solaire Photovoltaïque	09
Fig. 1. 5	Energie Solaire thermique	10
Fig. 1. 6	Panneaux à capteurs plans	11
Fig. 1. 7	Schéma d'un panneau parabolique composé	12
Fig. 1. 8	Capteur cylindro-parabolique	13
Fig. 1. 9	Miroirs Fresnel	13
Fig. 1.10	Capteurs paraboliques à moteur sterling	14
Fig. 1.11	Tour solaire	14
Fig. 1.12	Chauffe-eau solaire (Thermosiphon)	15
Fig. 1.13	Chauffe-eau solaire (Circulation forcée)	16
Fig. 1.14	Transfert de chaleur par conduction	17

Chapitre 2

Fig. 2. 1	Le schéma synoptique du chauffe eau solaire	22
Fig. 2. 2	Evolutions des températures le long d'échangeurs.....	25
Fig. 2. 3	Sortie des variables des états du chauffe-eau solaire à Imoy =800W/m2	31
Fig. 2. 4	Sortie des variables des états du C.S du 23/09/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	31
Fig. 2. 5	L'irradiation solaire du 23/09/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	32
Fig. 2. 6	Température ambiante du 23/09/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	32
Fig. 2. 7	Schéma bloc de la commande avec le régulateur PI.....	33
Fig. 2. 8	Réponse de sortie avec le régulateur PI	33
Fig. 2. 9	Signal de commande (u) du régulateur PI	33

Chapitre 3

Fig. 3. 1	Structure de base de la commande prédictive	37
Fig. 3. 2	Horizon glissant	39
Fig. 3. 3	Irradiation solaire du 30/05/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	47
Fig. 3. 4	Température ambiante du 30/05/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	47
Fig. 3. 5	Sortie du capteur solaire (Tc)	47
Fig. 3. 6	Signal de la commande (u)	47
Fig. 3. 7	Température de sortie (Ts) du contrôleur GPC sans contraintes	48
Fig. 3. 8	Variation de la commande.(Δu)	48

Fig. 3.9	Variation de la sortie (Δy)	48
Fig. 3.10	Signal de commande (u) avec contraintes positives	48
Fig. 3.11	Réponse du signal de sortie.(T_s) du contrôleur GPC avec contraintes	49
Fig. 3.12	Influence de l'horizon de commande (N_c)	50
Fig. 3.13	Eclairement solaire du 25/04/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	51
Fig. 3.14	Sortie du capteur solaire (T_c) du 25/04/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	51
Fig. 3.15	Réponse du signal de sortie (T_s) du 23/092013	51
Fig. 3.16	Signal de commande (u)	51
Fig. 3.17	Réponse du signal de sortie (T_s) avec différents coefficients de transfert (U_{ex})	52
Fig. 3.18	Réponse du signal de sortie (T_s) avec différentes températures de charge (T_d)	52

Chapitre 4

Fig. 4.1	Changement de structure par commutation d'une contre-réaction d'état	56
Fig. 4.2	Changement de structure par commutation au niveau de l'organe de commande	57
Fig. 4.3	Changement de structure avec ajout de la commande équivalente	57
Fig. 4.4	Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	58
Fig. 4.5	Commande équivalente (u_{eq})	62
Fig. 4.6	Fonction Sign et Sat	63
Fig. 4.7	Schéma bloc de la commande par mode de glissement	64
Fig. 4.8	Réponse du signal de sortie.(T_s) du contrôleur MG sans contraintes	65
Fig. 4.9	Signal de commande (u) Par MG	65
Fig. 4.10	Surface de glissement ($S(e)$)	65
Fig. 4.11	Réponse du signal de sortie (T_s) du contrôleur MG avec contraintes	66
Fig. 4.12	Signal du commande (u) Par MG avec contraintes	66
Fig. 4.13	L'irradiation solaire du 25/06/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	67
Fig. 4.14	Température ambiante du 25/06/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	67
Fig. 4.15	Sortie du capteur solaire (T_c) du 25/04/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	67
Fig. 4.16	Test de robustesse par rapport au perturbation	68
Fig. 4.17	Test de robustesse par rapport au variation paramétrique (U_{ex})	69
Fig. 4.18	Effet de variation de la charge (T_d)	70

Chapitre 5

Fig. 5.1	Irradiation solaire du 28/10/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	72
Fig. 5.2	Température ambiante du 28/10/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl)	72
Fig. 5.3	Commande PI	73
Fig. 5.4	Commande GPC	74
Fig. 5.5	Commande par MG	75
Fig. 5.6	Réponse du signal de sortie (T_s) au différents commande appliquées	76

Liste des Symboles et Acronymes

symbole	Descriptions	unités
A_c	Surface du capteur solaire.	m^2
A_{ec}	surface d'échange de l'échangeur thermique.	m^2
A_s	Surface de la cuve stockage.	m^2
c	Vitesse de lumière.	m/s
Cp_c	capacité thermique spécifique.	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	Diamètre du tube de fluide.	m
F_r	facteur de correction.	sans unité
g	accélération de la pesanteur.	m/s^2
G	L'ouverture du capteur cylindro parabolique.	m
h	Constant de Planck = $6,626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$.	J.s
H	distance entre deux plans horizontaux du réservoir et du capteur.	m
H_t	Coefficient de transfert de chaleur par convection.	
I	Rayonnement solaire.	W/m^2
k	Constant de Boltzmann.	$J.K^{-1}$
K_s	Coefficient de perte de chaleur de la cuve de stockage.	sans unité
l	longueur de chaque segment de tube du fluide caloporteur.	m
\dot{m}_c	Débit massique entre l'échangeur thermique et le capteur solaire.	m^3/s
\dot{m}_s	Débit massique entre l'échangeur thermique et la cuve de stockage.	m^3/s
Q_c	quantité de chaleur.	W
Q_{per}	Energie perdu.	W
Q_u	Energie utile.	W
Δq	Opérateur de retard.	
P_{rc}	pertes thermiques convectifs à l'extérieur du tube par unité de longueur.	W/m
T_{ec}	Température entre la sortie de l'échangeur et l'entrée du capteur solaire.	$^{\circ}C$
T_{es}	Température entre la sortie de l'échangeur et l'entrée de la cuve de stockage.	$^{\circ}C$
T_s	Température de la cuve de stockage.	$^{\circ}C$
ΔT_{ml}	Ecart logarithmique moyen.	$^{\circ}C$

ΔT_{moy}	Ecart de la température moyenne.	°C
U_L	Coefficient de transmission globale (de l'eau vers l'air) du capteur.	W/m ² C
U_{es}	Coefficient d'échange thermique.	W/m ² C
\dot{V}_c	Débit volumique entre l'échangeur thermique et le capteur solaire.	m ³ /s
\dot{V}_l	Débit volumique de l'eau froide.	m ³ /s
\dot{V}_s	Débit volumique entre la cuve de stockage et l'échangeur thermique.	m ³ /s
Lettres grecques :		
η	Rendement du capteur solaire.	sans unité
ρ_c	Masse volumique du fluide du capteur.	kg/m ³
ρ_{ch}	Masse volumique du fluide chaud.	kg/m ³
ρ_{fr}	Masse volumique du fluide froid.	kg/m ³
ρ_m	Masse volumique du métal.	kg/m ³
ρ_{moy}	Masse volumique moyenne de l'eau.	kg/m ³
ρ_s	Masse volumique du fluide de la cuve de stockage.	kg/m ³
α	Facteur d'absorption de l'absorbeur.	sans unité
τ	Facteur de transmission du vitrage.	sans unité
φ	flux de chaleur transmis par conduction.	W
λ	Conductivité thermique .	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
ν	Fréquence.	Hz
ϑ	vitesse moyenne du fluide dans la conduite	m/s
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.	W.m ⁻² .K ⁻⁴

Abréviation

PI: Proportionnel intégrateur.

GPC: Commande prédictive généralisée.

MG: Commande par mode de glissement.

Introduction Générale

L'épuisement des sources d'énergies conventionnelles, les problèmes de pollution, les risques liés au nucléaire et les progrès technologiques font que le monde se tourne de plus en plus vers les énergies renouvelables, en particulier le solaire et l'éolien, malgré les coûts élevés qui freinent quelque peu l'expansion de ces sources d'énergie inépuisables et propres.

L'énergie solaire qui est l'une des énergies nouvelles les plus facilement exploitables, a connu ces dernières années un grand essor de par la diversité de ses applications et l'intérêt qu'elle suscite à travers le monde. Cependant, le prix élevé de l'énergie solaire par rapport à celui des sources d'énergie conventionnelles constitue un handicap face à l'expansion tant attendue de l'utilisation de l'énergie solaire.

L'optimisation des systèmes énergétiques solaires est parmi les solutions préconisées pour tendre de renverser la tendance actuelle des choses et voir les applications de l'énergie solaire se répandre d'avantage de par le monde.

L'application, la plus simple et la plus immédiate de l'énergie solaire est la production d'eau chaude à usage domestique. C'est aussi l'une des plus anciennes en effet, plusieurs systèmes de chauffe-eau solaires ont été conçus depuis les débuts du vingtième siècle jusqu'à nos jours à travers le monde, plus performants les uns que les autres.

Malgré que l'application du chauffe-eau solaire est apparue depuis long temps, son utilisation intégré au bâtiment n'a toujours pas connu un avancement important en Algérie, surtout avec le lancement du grand programme de construction des bâtiments (programme AADL1 et AADL2). Cela est dû à deux causes essentielles : le bas prix du gaz (subventionné par l'état) et l'ignorance total du bon rendement économique d'un tel système. D'après [73], le bâtiment consomme 40 % de taux de consommation énergétique totale. L'intégration du chauffe-eau solaire dans un bâtiment est une technologie prometteuse qui permettrait d'économiser beaucoup d'énergie, sans polluer l'environnement ; ce qui nécessite à proposer une nouvelle stratégie pour promouvoir l'utilisation d'intégration du chauffe-eau solaire durant la construction du bâtiment.

Le chauffe-eau solaire individuel peut fonctionner sans commande (thermosiphon). Mais, dans le cas d'une installation collective, où la consommation de l'eau est très importante (circulation forcée), il est impératif d'intégrer une régulation qui permet de régler et donner la température voulue, et économiser l'énergie.

Un système de chauffage solaire de l'eau se compose généralement de trois parties : la captation, le stockage et la distribution. La captation est la partie principale de la conversion solaire : elle est constituée par le capteur solaire ou le collecteur. C'est ce dernier qui convertit

l'énergie solaire en chaleur et la transmet au fluide caloporteur contenu dans l'absorbeur. Le rendement instantané du capteur solaire plan varie avec la géométrie du capteur, ses paramètres internes et les paramètres externes comme l'ensoleillement, la température ambiante etc.

L'utilisation du chauffe-eau solaire, dans des nombreux établissements résidentiels, commerciaux, institutionnels,..., nécessite une régulation de la température. La commande du chauffe eau solaire, lors des premières utilisations, était basée sur la commande « tout ou rien » et continue encore maintenant pour certaines études, publications et travaux scientifiques utilisent cette commande [53].

Dans ce mémoire, nous avons développé, dans un premier temps, un nouveau modèle dynamique du chauffe-eau solaire, suivi d'une commande robuste qui prend en considération la dynamique variable du système.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des bases du rayonnement et de l'énergie solaire thermique. Il débute avec les notions sur le rayonnement solaire extraterrestre et terrestre, ainsi que sur l'énergie renouvelable, le fonctionnement du chauffe-eau solaire et à la fin d'un rappel théorique sur les modes de transfert thermique.

Dans le second chapitre, nous élaborons un nouveau modèle mathématique régissant le comportement dynamique du système thermique, suivi d'une linéarisation du système qui est non linéaire. Enfin, nous terminons ce chapitre par des résultats de simulation du modèle en boucle ouverte et en boucle fermée.

Le modèle dynamique établi est utilisé au chapitre trois pour le développement de la commande prédictive. La commande est élaborée à partir de la minimisation d'un critère quadratique basé sur l'écart entre la sortie prédite et la référence. Ensuite, nous étudions un type de commande prédictive, qui est la commande prédictive généralisée afin de l'appliquer au chauffe-eau solaire.

Il est présenté, dans le quatrième chapitre, la commande par mode de glissement. Nous présentons, en premier lieu, un rappel théorique sur la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable. Nous aborderons, ensuite, la conception de l'algorithme de commande avec ses différentes étapes. Enfin, nous appliquons la commande développée sur le chauffe-eau solaire.

Une étude comparative entre les commandes développées est effectuée au dernier chapitre. Cette étude permet de comparer les performances et de proposer la meilleure approche. Finalement nous terminerons cette étude par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

*Rayonnement
et énergie solaire thermique*

I.1 Introduction

L'énergie solaire est la lumière éclatante et la chaleur du Soleil qui a été exploitée par les humains depuis les temps anciens en utilisant une gamme de technologies en constante évolution. Le rayonnement solaire ainsi que les ressources solaires secondaires telles que : l'énergie éolienne et l'énergie des vagues, l'hydroélectricité et la biomasse comptent pour la plupart de l'énergie renouvelable disponible sur la planète terre. Cependant, une fraction infime de l'énergie solaire disponible est utilisée.

L'énergie rayonnée par le soleil est la plus grande source d'énergie renouvelable disponible à partir de la terre. Nous présentons dans ce chapitre en premier lieu le rayonnement solaire, en suite, l'énergie solaire. Et, en fin de ce chapitre l'un des applications de l'énergie solaire thermique: le chauffe-eau solaire et quelques rappels sur les modes de transfert thermique.

I.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements: de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma, aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées.

Le rayonnement solaire est une onde électromagnétique émise par la surface du soleil qui naît dans la masse du soleil où les réactions de fusion convertissent des atomes d'hydrogène en hélium. Chaque seconde 3.89.1026 J de l'énergie nucléaire est libéré par le noyau du soleil [78]. Ce flux d'énergie nucléaire est rapidement converti en énergie thermique et transporté vers la surface de l'étoile où elle est libérée sous forme d'un rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement solaire recouvre une gamme assez large de longueurs d'ondes, allons des ondes radio (grande longueur d'onde) jusqu'aux rayons X (petite longueur d'onde). Il présente un maximum d'environ 410 nm. L'œil humain n'est, cependant, sensible qu'à une petite partie du spectre solaire : le rayonnement visible qui est compris entre 400 et 700 nm (du violet au rouge).

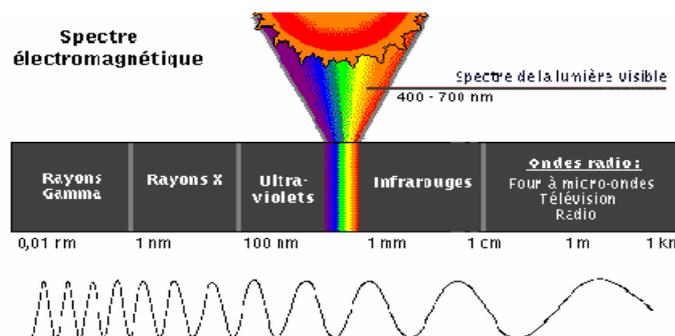


Fig. 1.1 Specter solaire [27]

La lumière visible est une fenêtre étroite (0,4 à 0,7 μm) encadrée par le rayonnement infrarouge (0,7 à 100 μm) et les rayons thermiques U.V (0,1 à 0,4 μm) (Fig.1.1). Les rayonnements thermiques se situent entre 0,1 et 100 micromètres. Ils se caractérisent par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique voit son énergie calorifique diminuer et un corps recevant un rayonnement thermique voit son énergie calorifique augmenter.

I.2.1 Le rayonnement solaire extraterrestre

La figure 1.2 montre le spectre du rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre. La gamme entre 200 - 2500 nm, comprend 96,3% de l'irradiation solaire totale avec 3,7% restants pour d'autres longueurs d'ondes. De nombreuses applications impliquent seulement une zone sélectionnée de l'ensemble du spectre.

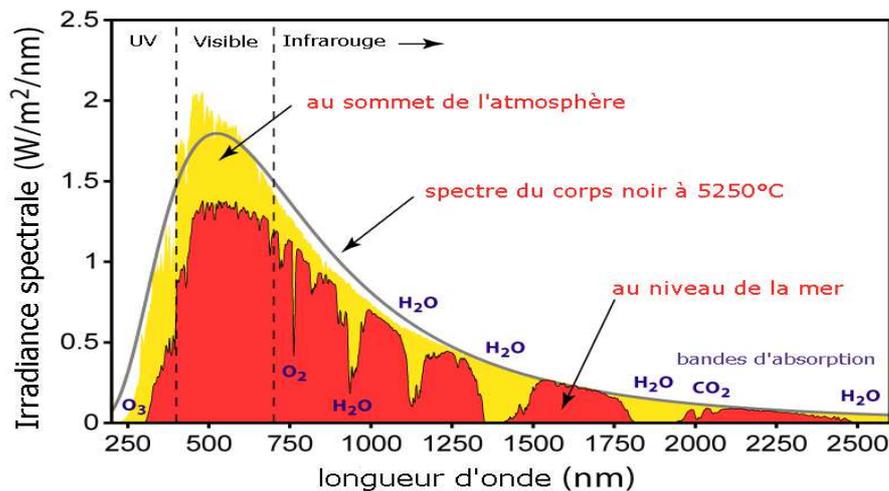


Fig. 1.2 : Spectre du rayonnement solaire extraterrestre [62]

Le spectre solaire dans l'espace extra-atmosphérique est significativement différent de ce qui est trouvé à la surface de la terre. Il est semblable à un spectre de corps noir qui est exprimé par l'équation de Planck donné ci-dessous :

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{2h\nu^3}{\left[e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1\right]} \quad (1.1)$$

où:

I : Irradiation solaire (W/m^2).

h : Constant de Planck.

ν : Fréquence (Hz).

k : Constant de Boltzmann.

c : Vitesse de lumière (m/s).

T : Température du corps

I.2.2 Le rayonnement solaire terrestre

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre comporte plusieurs éléments: le rayonnement direct provenant directement du soleil, rayonnement diffus dispersé dans le ciel et le rayonnement supplémentaire réfléchi par l'environnement (sol ou mer) (Fig.1.3).

Le rayonnement direct, reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I : l'énergie reçue (irradiation) en $W.m^{-2}$.

L'atmosphère joue un rôle de filtre et absorbe une partie du rayonnement solaire. Au dessus de l'atmosphère terrestre, le spectre de radiation est presque continu; c'est à dire sans "trou" marqué.

Au niveau de la mer, et après avoir traversé une épaisseur d'atmosphère (1 AM), ce spectre est modifié: l'énergie globale est moindre, bien sûr, mais certaines bandes ont particulièrement absorbées; certaines composantes infrarouges existent également dans ce spectre.

Une grande partie du spectre terrestre est absorbée dans la partie UV. La couche atmosphérique nous protège toujours de ces rayonnements à haute énergie qui sont potentiellement nuisibles.

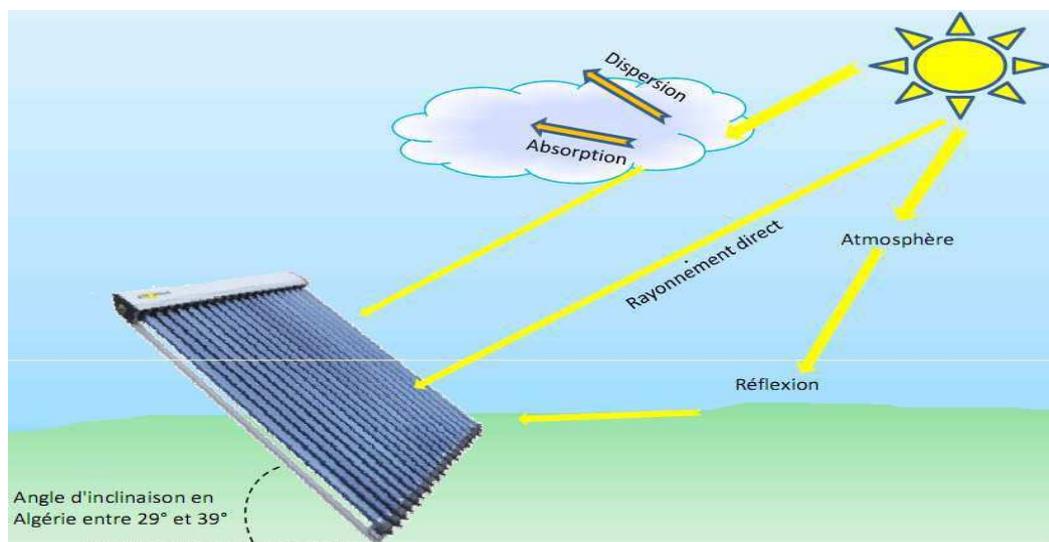


Fig. 1.3 : Spectre du rayonnement Solaire terrestre

I.2.3 Constante solaire

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et situées à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre. Cette distance varie quelque peu au cours de l'année. Compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même pour la puissance reçue au niveau de la surface en question. Néanmoins le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi, nous appelons

constante solaire, notée C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre [36].

Un grand nombre de données ont été recueillies lors des missions spatiales par des satellites d'observation. Citons de 1978 à 1994: NIMBUS-7 de la mission SMM (Solar Maximum Mission), ERBS (Earth Radiation Budget Satellite), NOAA-9 (National Oceanic and Atmospheric Administration US), UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) [36].

En l'an 2000, la communauté internationale a choisi pour la constante solaire la valeur: $C^* = 1366 \text{ W/m}^2$.

L'irradiance tombant sur les changements de l'atmosphère de la terre de plus d'un an est d'environ 6,6% en raison de la variation de la distance Terre / Soleil. Les variations de l'activité solaire provoquent des changements d'éclairement d'un maximum de 1%.

I.3 Énergie solaire

Le soleil a environ 1,4 millions de kilomètres de diamètre et sa température intérieure est d'environ 15 millions de degrés Kelvin [71].

Cette température élevée, combinée à une pression est de 70 milliards de fois plus élevée que la pression atmosphérique sur la terre, crée des conditions idéales pour des réactions de fusion.

La réaction de fusion dans le soleil comporte deux atomes d'hydrogène qui se combinent pour former un atome d'hélium, libérant l'énergie au cours de ce processus. Cette énergie est libérée sous forme de haute énergie du rayonnement gamma. Comme les rayons gamma rayonnent à partir du centre vers l'extérieur de la sphère solaire, ils réagissent avec les médias solaires et se transforment en rayonnements de plus basse énergie, particulièrement à la lumière et à la chaleur des parties visibles du spectre d'énergie. Le soleil produit de l'énergie de cette manière depuis environ 5 milliards d'années et continuera à le faire pendant plusieurs milliards d'années. Les bases de l'énergie solaire, le rayonnement solaire et les mécanismes de transfert d'énergie ont fait l'objet de plusieurs publications [39], [67], [72].

L'énergie solaire est l'énergie de la lumière solaire recueillie et exploitée pour fournir de l'électricité, pour chauffer l'eau et pour chauffer ou climatiser les maisons, les entreprises et l'industrie...

I.3.1 Énergie solaire photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques solaires (PV) convertissent directement la lumière solaire en électricité sur le principe de l'effet photovoltaïque [46] qui a été découverte par E. Becquerel en 1839. Bien que les premières cellules photovoltaïques ont été utilisés pour produire de

l'électricité pour les satellites, il existe de nombreux systèmes de production d'électricité photovoltaïque pour les applications résidentielles et industrielles.

Les cellules photovoltaïques sont regroupées en modules appelés **panneaux**, les derniers sont regroupées en module appelé **générateur** dont le nombre de panneaux (où générateurs) utilisés détermine la puissance de l'électricité produite. (Fig. 1.4)

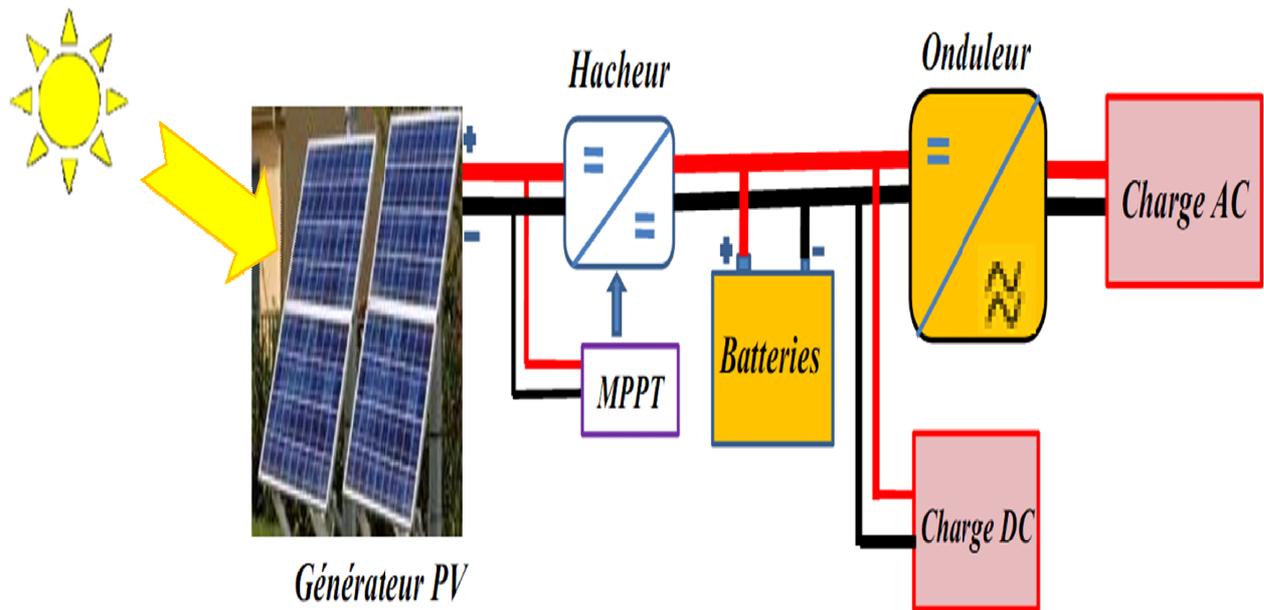


Fig. 1.4 : Schéma synoptique Energie Solaire Photovoltaïque

I.3.2 Energie Solaire Thermique

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est la récupération de la chaleur provenant du soleil afin de l'utiliser pour le chauffage de l'air ou de l'eau. Les capteurs solaires thermiques transmettent la chaleur émise par le soleil à un circuit de fluide caloporteur. La chaleur est ensuite transmise à un ballon d'eau pour la production d'eau chaude sanitaire, à un hydro accumulateur ou à un plancher solaire pour le chauffage de l'habitation.

L'énergie solaire thermique peut être utilisée soit directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (pour la production de vapeur d'eau entraînant des alternateurs pour générer de l'énergie électrique). (Fig. 1.5)

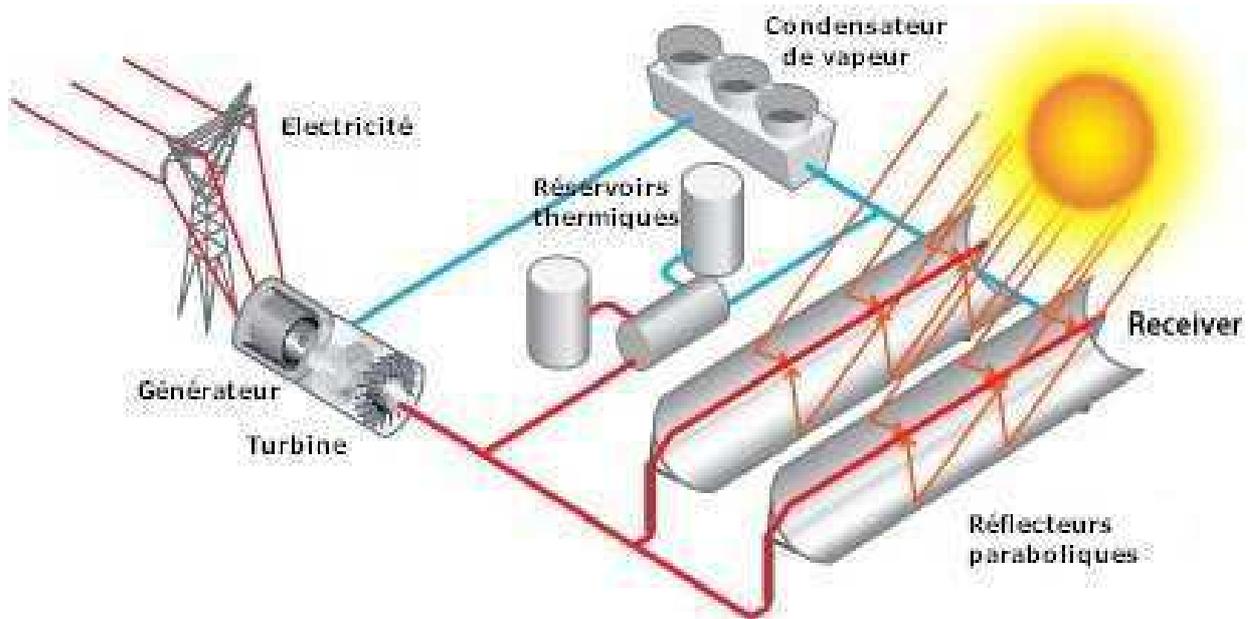


Fig. 1.5 : Energie Solaire thermique [26]

I.4 Capteurs Solaires thermiques

L'élément essentiel d'un système solaire thermique est le capteur solaire. C'est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire incident, le convertit en chaleur et transfère la chaleur à un fluide (généralement l'air, l'eau ou l'huile) circulant à travers le collecteur. L'énergie solaire captée est récupérée à partir de la circulation du fluide. Puis, directement transmise au chauffage de l'eau ou indirectement pour le chauffage de l'espace conditionné chaud. Elle peut également être transmise à un réservoir de stockage d'énergie thermique à partir duquel elle est récupérée pour une utilisation de nuit ou par temps nuageux.

Il existe plusieurs types de panneaux solaires thermiques, ils peuvent être classifiés selon plusieurs critères. Le principal critère de classification est la motricité (la poursuite). On distingue deux types de panneaux solaires:

- Fixe ou stationnaire.
- Mobiles.

I.4.1 Capteurs solaires thermiques fixes

Ces collecteurs sont fixés de façon permanente en position et ne suivent pas le soleil. Trois principaux types de collectionneurs entrent dans cette catégorie:

I.4.1.1 Capteur plan (flat plane)

Les capteurs plans sont principalement utilisés pour le chauffage de l'eau résidentiels et des installations de chauffage de locaux. Les capteurs plans transfèrent la chaleur du soleil à l'eau, soit directement, soit par l'utilisation d'un autre fluide et un échangeur de chaleur.

Ce type de panneaux ne nécessite pas la poursuite du soleil. Ils doivent être orientés directement vers l'équateur (Fig. 1.6) et dirigés vers le sud dans l'hémisphère nord ou vers le nord dans l'hémisphère sud [66]. L'angle d'inclinaison optimal est égal à la latitude de la région plus ou moins 5° . A titre d'exemple l'angle d'inclinaison au nord de l'Algérie est compris entre 31° et 41° , car la latitude est estimée à 36° N. A Djelfa, l'angle est compris entre 29° et 39° , car la latitude est 34° N.

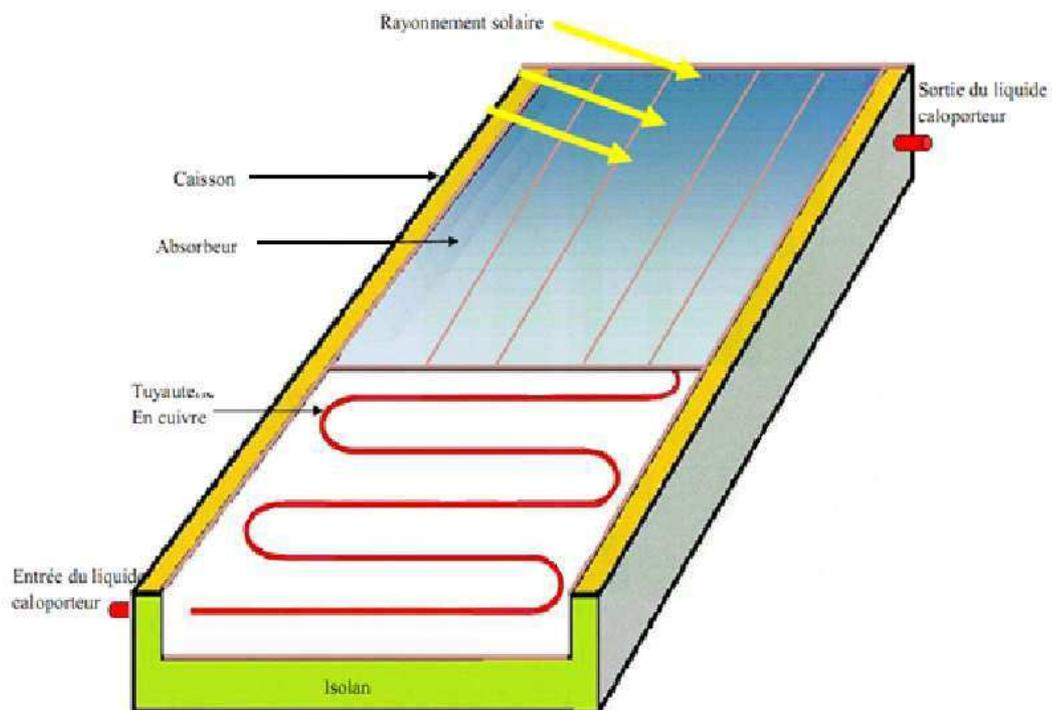


Fig. 1.6 : capteur solaire plan

I.4.1.2 Capteur parabolique composé (CPC)

Le CPC est constitué de deux portions de paraboles identiques placées symétriquement par rapport à un axe (Fig. 1.7). Tous les rayonnements entrant dans l'ouverture à l'intérieur de l'angle d'acceptation du collecteur trouvent leur chemin vers la surface de l'absorbeur, situé au fond du collecteur, avec un degré d'efficacité relativement élevé.

Deux types de collecteurs CPC ont été conçus; le symétrique et l'asymétrique.

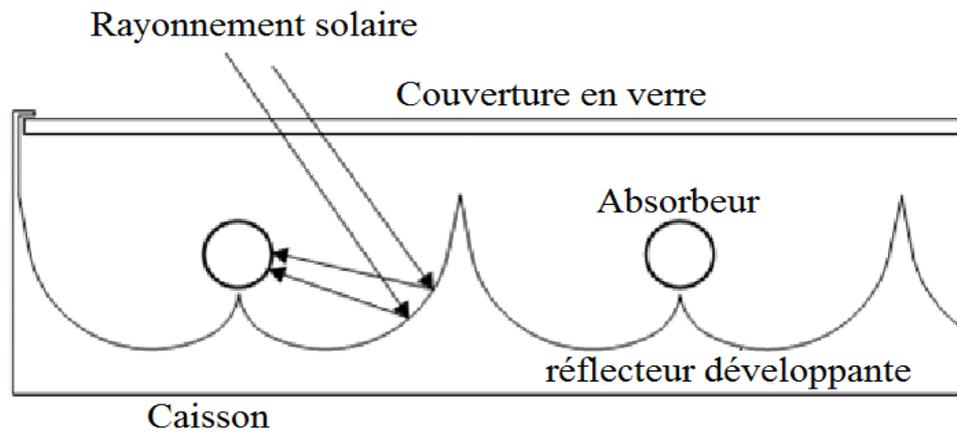


Fig. 1.7 : Schéma d'un panneau parabolique composé [63].

I.4.1.3 Capteur sous vide.

Les capteurs sous vide sont des capteurs solaires plans simples et classiques: Ils ont été développés pour une utilisation dans les climats chauds et ensoleillés. Ils sont très utilisés pour des applications de chauffage de l'eau domestique. Bien que le rendement dépasse 80 %, leurs gains diminuent considérablement lorsque les conditions deviennent défavorables pendant les jours froids et nuageux.

I.4.2 Capteurs solaires thermiques mobiles

La température d'un capteur solaire thermique peut être augmentée par la concentration des radiations solaires sur une zone relativement petite du capteur. Ceci est réalisé par l'interposition d'un dispositif optique entre la source de rayonnement et la surface d'absorption de l'énergie. Aussi, grâce à une structure portante qui permet d'orienter les panneaux solaires (suiveur du soleil ou traquer) afin d'en augmenter la productivité.

Plusieurs technologies de concentration solaire mobiles existent. Les principales sont [69]:

I.4.2.1. Capteurs cylindro-paraboliques

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal qui se déroule le long de l'intérieur de la surface courbe (Fig. 1.8). Généralement, l'huile est utilisée en tant que fluide. L'énergie solaire chauffe l'huile s'écoulant à travers le tube récepteur. La chaleur est ensuite utilisée pour la production de l'électricité à travers un générateur de vapeur classique.

Les capteurs cylindro-paraboliques peuvent produire des températures comprises entre 50 ° C et 400 ° C.

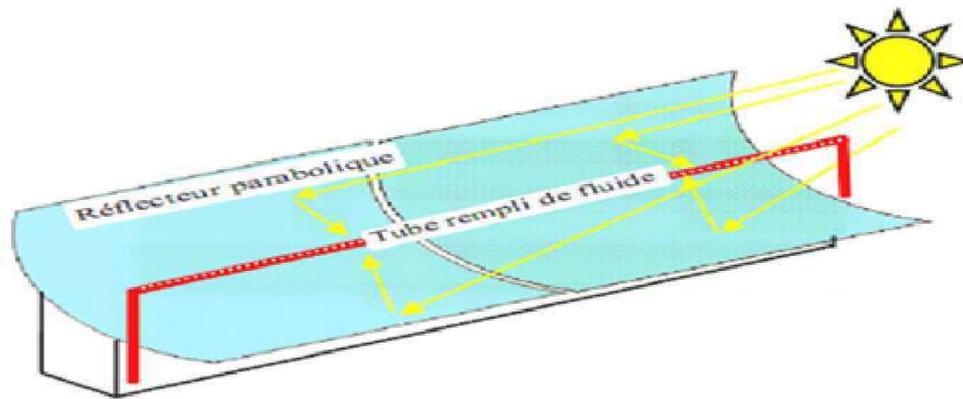


Fig. 1.8 : Capteur cylindro-parabolique

I.4.2.2. Miroirs Fresnel

Ces capteurs utilisent des miroirs concentrateurs linéaires qui permettent d'élever la température d'un fluide caloporteur à 450°C. Le plus grand avantage de ce type de système est l'utilisation des réflecteurs plats de manière moins chers que les réflecteurs paraboliques de verre. En outre, ceux-ci sont montés à proximité du sol, ce qui minimise les exigences structurelles. (Fig. 1.9)

Cette technologie permet la réduction des coûts de production de 50% par rapport à aux réflecteur traditionnels [65].

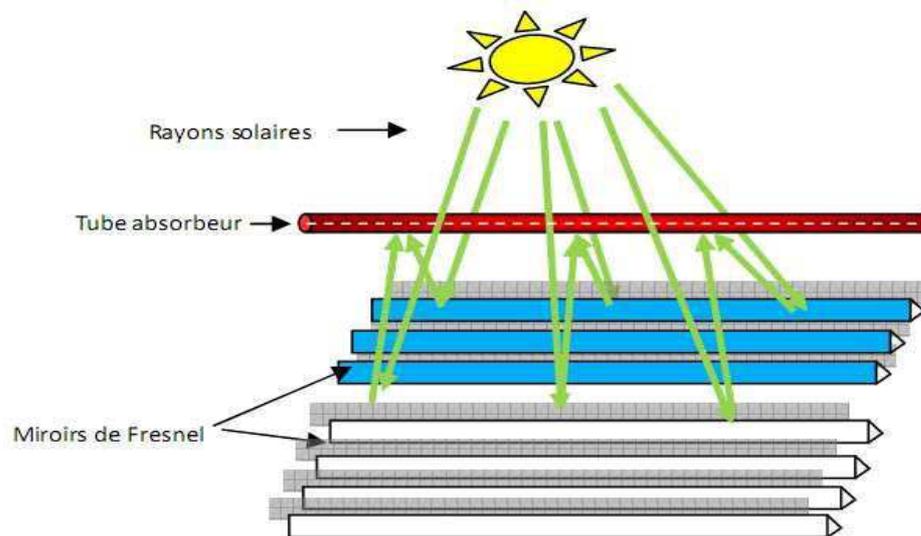


Fig. 1.9 Miroirs Fresnel

I.4.2.3. Capteurs paraboliques à moteur Stirling

Le concentrateur parabolique est un miroir qui réfléchit les rayons du soleil sur un récepteur placé au point focal du réflecteur, Le concentrateur est capable de suivre le soleil sur deux axes : horizontal et vertical.

Un petit moteur Stirling à piston libre est positionné au point focal de la parabole pour la cogénération de la chaleur et de l'électricité. (Fig.1.10)

La température sur le récepteur peut atteindre 1000 °C. Les systèmes paraboliques Stirling actuels atteignent 25 kW. Ce type de concentrateur qui a un rendement élevé est utilisé pour la production de l'hydrogène [13].

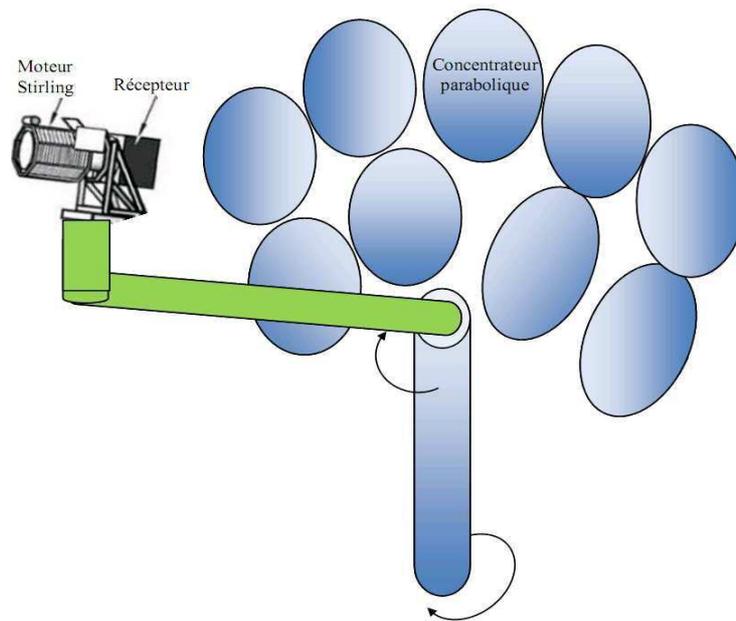


Fig. 1.10 Capteur parabolique à moteur Stirling

I.4.2.4. Tour solaire.

La tour solaire est constituée de réflecteurs (héliostats) utilisés pour concentrer l'énergie solaire sur un récepteur, au sommet d'une tour (Fig1.11). Un fluide de transfert de chaleur est utilisée pour transférer l'énergie vers le récepteur qui, à son tour, est utilisée pour produire de la vapeur. Des turbines à vapeur classique sont utilisées pour générer l'électricité.

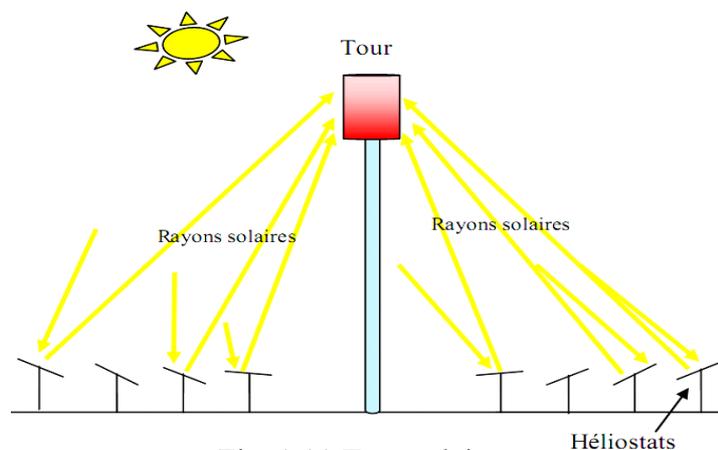


Fig. 1.11 Tour solaire

I.5 Chauffe-eau solaire

Le chauffe-eau solaire est l'un des systèmes solaires thermiques pour la production de l'eau chaude sanitaire de faible niveau de température. Ce système se compose d'un capteur solaire, généralement placé sur les toitures, d'un réservoir permettant de stocker l'eau chaude et d'un circuit hydraulique qui peut être une simple canalisation dans le cas d'un système à thermosiphon ou bien doté d'une pompe de circulation dans le cas d'un système actif.

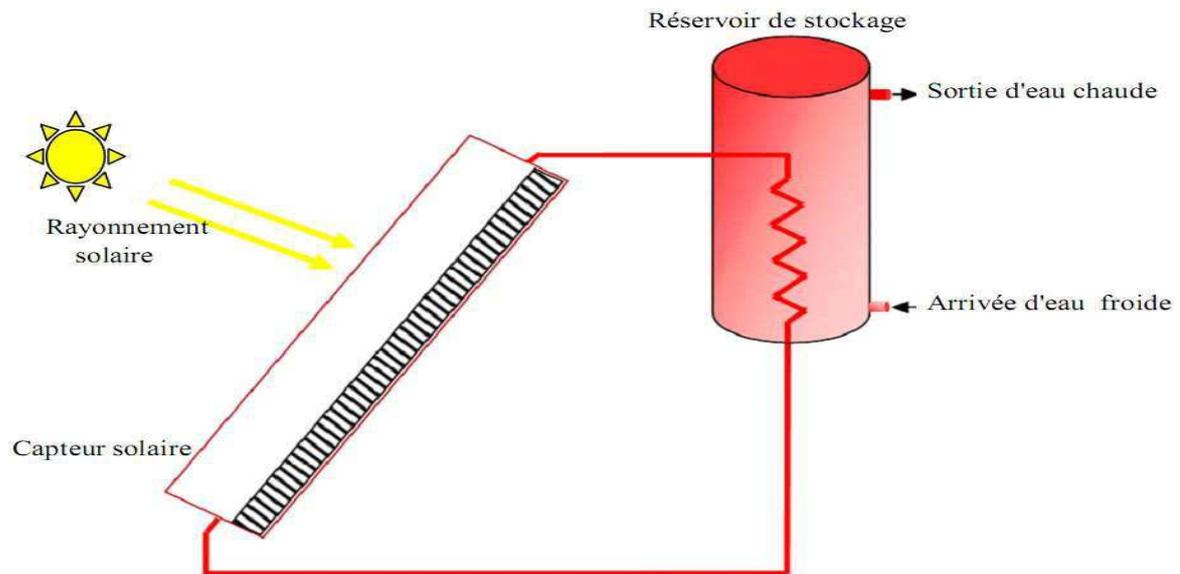


Fig. 1.12 Chauffe-eau solaire (Thermosiphon)

L'eau peut être chauffée soit, directement, dans le collecteur (systèmes directs) soit, indirectement, par un fluide de transfert de chaleur. Ce dernier est chauffé dans le capteur et passe à travers un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur à l'eau.

Le chauffe-eau solaire peut être selon le mode transfert de la chaleur du fluide caloporteur à l'eau classé de la façon dont le fluide de transfert de la chaleur est transporté:

- Les systèmes naturels (ou passifs).
- Circulation forcée (ou active) des systèmes

I.5.1 Thermosiphon

Il est basé sur la circulation naturelle d'un liquide dans une installation du fait de la variation de sa masse volumique en fonction de la température (Fig. 1.12). Dans un chauffe-eau solaire en thermosiphon, le liquide caloporteur, réchauffé dans le capteur solaire, se dilate, et, plus léger, il monte vers le ballon de stockage. Il est remplacé par le liquide froid descendant du ballon [38], [61], [64].

Cependant, pour éviter un écoulement inverse de l'eau pendant la nuit, le réservoir doit être suffisamment élevé, situé au-dessus du champ des capteurs. La figure 1.12 représente un modèle simplifié de configuration de thermosiphon.

Le mouvement du fluide est caractérisé par la relation suivante :

$$H \cdot g \cdot (\rho_f - \rho_c) = \frac{f \cdot \vartheta^2}{2} \rho_{moy} \quad (1.2)$$

où:

H : distance entre les deux plans horizontaux du réservoir et du capteur(m).

g : accélération de la pesanteur (m/s^2).

ρ_{fr} : Masse volumique du fluide froid (kg/m^3).

ρ_{ch} : Masse volumique du fluide chaud (kg/m^3).

$\rho_{moy} = \sqrt{\rho_{fr} \cdot \rho_{ch}}$: masse volumique moyenne de l'eau en (kg/m^3).

f : coefficient adimensionnel de perte de charge dans la conduite de circulation.

ϑ : vitesse moyenne du fluide dans la conduite (m/s).

I.5.2 Circulation forcée (par pompe)

En utilisant la pompe, la circulation devient plus souple et donc on a moins de contraintes pour le dimensionnement de l'échangeur de chaleur. Comme la circulation est forcée, le parcours des caloporteurs dans le capteur n'a pas une grande importance, et la bonne circulation du fluide devient indifférente de la position du réservoir. (Fig.1.13)

Cette configuration convient pour une installation collective où la consommation d'eau est très importante. Il faut une régulation qui permet de régler et donner la température voulue et d'économiser l'énergie. Cette configuration a été retenue pour notre étude et sera détaillée dans les prochains chapitres.

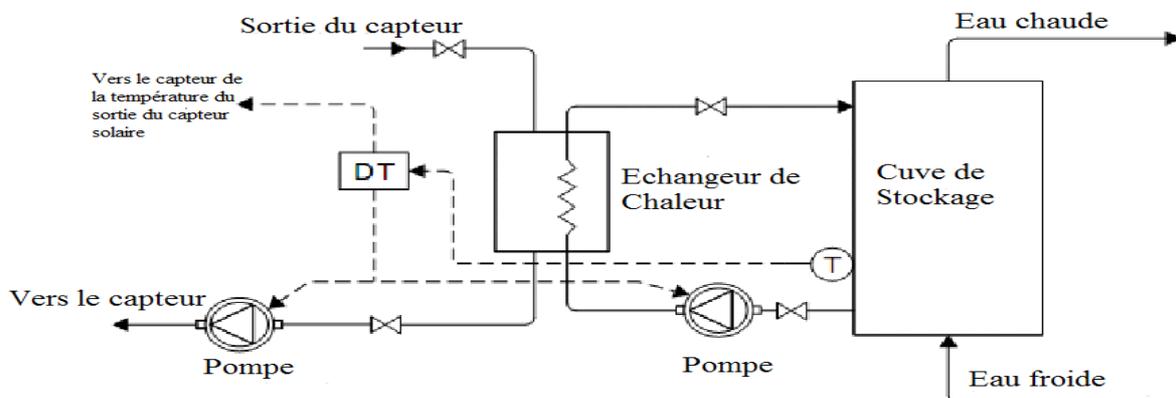


Fig. 1.13 Chauffe-eau Solaire (Circulation forcée) [63].

I.6 Rappel sur les modes de transferts thermiques

I.6.1 Modes de transfert de la chaleur

L'échange thermique est un phénomène de transfert de l'énergie sous forme microscopique désordonnée. Il intervient lorsque deux corps sont à des températures différentes. Il existe trois modes de transfert de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

I.6.1.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction est un transfert de chaleur dans un milieu matériel (solide ou fluide) sans mouvement de matière. C'est le seul mode de transfert de la chaleur à l'intérieur d'un solide.

Le transfert de la chaleur par conduction se base sur la loi de Fourier qui dite que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de la température, elle est donnée par les équations suivantes [15]:

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (1.3)$$

Avec : φ = flux de chaleur transmis par conduction [W]

λ : Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

T : Température du point M du corps ($^{\circ}\text{C}$).

En se limitant à deux variables l'une spatiale x et l'autre de temps t , l'équation (1.3) devient.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.4)$$

où: $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$: Diffusivité thermique supposée constante ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Si l'on peut considérer le problème comme unidimensionnel ("écoulement" de la chaleur dans une seule direction), nous avons, alors, en coordonnées cartésiennes $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$, ce qui conduit à une répartition linéaire de la température en fonction de la distance : (Fig. 1.14)

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{l} x. \quad (1.5)$$

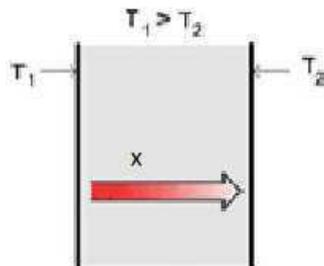


Fig. 1.14 Transfert de chaleur par conduction

I.6.1.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de la chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Ce mode de transfert de la chaleur met en jeu une quantité de chaleur Q_c (en W) qui est donnée par la formule de NEWTON-RIEMANN :

$$Q_c = U_{es} \cdot A_c \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

avec : - U_{es} : représente le coefficient d'échange convectif ($W.m^{-2}C^{-1}$)

- A_{es} : la surface d'échange (m^2).

- ΔT : l'écart de température moyen entre les deux fluides ($^{\circ}C$).

I.6.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou un milieu transparent, par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Nous ne considérerons que les corps solides opaques au rayonnement.

Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement au rayonnement solaire, Cependant, nous allons rappeler la notion du corps noir.

I.6.2 Corps noir

C'est un concept théorique qui désigne un corps qui absorbe tout rayonnement qui lui parvient. Il ne réfléchit et ne transmet aucun rayonnement.

L'énergie émise par un corps noir est donnée par la relation de STEFAN-BOLTZMANN :

$$Q = \sigma \cdot A_{es} \cdot T^4 \quad (1.6)$$

avec : $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$: Constante de STEFAN-BOLTZMANN ($W.m^{-2}.K^{-4}$)

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le rayonnement solaire en premier lieu. Puis, nous avons abordé brièvement l'énergie solaire thermique et le principe de fonctionnement de l'une de ces applications, le chauffe-eau solaire, La production de l'eau sanitaire peut être utilisée sous tous les climats, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu où ils sont installés. Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le coût et les températures souhaitées.

A la fin de ce chapitre, nous avons présenté un rappel sur les phénomènes et les équations physiques qui sont à la base du principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire.

Chapitre II

Modélisation et linéarisation

d'un système solaire thermique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, développé un nouveau modèle du chauffe-eau solaire. C'est un modèle augmenté en introduisant les équations de l'échangeur de chaleur. Ce modèle, qui est non linéaire, a été linéarisé pour la synthèse des lois de commande. Nous terminerons ce chapitre, par la présentation des résultats de simulation du modèle en boucle ouverte et en boucle fermée en utilisant un contrôleur PI, afin de commander le comportement dynamique du système.

II.2 Modélisation d'un système solaire thermique

Plusieurs classifications des approches de modélisation des systèmes solaires thermiques peuvent être trouvées dans la littérature [8]. Les modèles de processus ont été utilisés à des fins différentes dans ce type d'installation solaire: notamment les modèles de contrôle, les modèles de simulation, les modèles d'optimisation, les modèles de tolérance aux pannes, et autres [13].

Les modèles de contrôle prennent en charge des plus simples modèles linéaires empiriques jusqu'au plus complexes modèles non linéaires de connaissance. Les modèles dépendent de plusieurs paramètres ; le plus important concerne la forme du capteur solaire (plan, cylindro-parabolique, parabolique). Les modèles décrits ci-après sont les modèles des capteurs cylindro-paraboliques qui sont les plus utilisés.

II.2.1 Modèle à paramètres regroupés

C'est un modèle basé sur des approches expérimentales. La variation de l'énergie interne du processus peut être décrit par :

$$C_1 \frac{\partial T_m(t)}{\partial t} = C_2 I(t) - C_3 \dot{V}(t)(T_{out}(t) - T_{in}(t)) - C_4 \Delta T(t) \quad (2.1)$$

où: \dot{V} : est le débit volumique de la pompe (m^3/s), les coefficients C_1 , C_2 , C_3 et C_4 peuvent être déterminés expérimentalement (pour les capteurs cylindro-*paraboliques* qui ont été déterminés dans [58] et pour le capteur plans dans [63]),

II.2.2 Modèle bilinéaire

C'est un modèle simplifié du système d'équations aux différences partielles. C'est le modèle utilisé par plusieurs auteurs [16], [56], [57].

Ce modèle s'appuie sur la loi de Fourier simplifiée décrite dans le chapitre I (équation 1.5) car le transfert de la chaleur est unidimensionnel. La variation de la température du fluide, le long du tube, peut être approchée par :

$$\left. \frac{\partial T_f}{\partial l} \right|_{l \in (l_{i-1}, l_i)} \approx \frac{T_{fi} - T_{fi-1}}{l}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

Où : l représente la longueur de chaque segment et n est le nombre de segments, $\ell = i.l$, $L = n.l$ longueur du tube, T_{fi} : température du fluide dans le segment i .

La dynamique du procédé peut être décrite par un système d'équations bilinéaires différentielles ordinaires :

$$\frac{dx_i}{dt} = -v \frac{x_i - T_{i-1}}{l} + \gamma I, \quad i = 1, \dots, n \quad x_0 = T_{in}. \quad (2.3)$$

avec : T_{in} : température initial, $\gamma = \frac{\eta_{cap} G}{\rho_f C_f A_f}$, η_{cap} : rendement du capteur thermique, I : irradiation solaire (W/m^2), ρ_f : densité du fluide, C_f : capacité thermique du fluide, A_f : section transversale à l'intérieur du tube.

$$\text{Le modèle peut être écrit sous forme : } \frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \quad (2.4)$$

Tel que : $f(x)$ est indépendant de x , $f(0) \neq 0$ et $g(x) = Bx$

$$f(x) = \gamma I \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad g(x) = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 - x_1 \\ \vdots \\ x_n - x_{n-1} \end{bmatrix} \quad B = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & \ddots & \dots & \vdots \\ & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

II.2.3 Modèle à paramètres distribués

Le bilan énergétique d'un système solaire thermique, sous certaines hypothèses générales, peut être décrit par le système d'équations aux différentielles partielles à coefficients variables suivants :

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m(t,x)}{\partial t} = \eta G I(t) - P_{rc} - D\pi H_t (T_m(t,x) - T_f(t,x)) \quad (2.5)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f(t,x)}{\partial t} + \rho_f C_f \dot{V}(t) \frac{\partial T_f(t,x)}{\partial x} = D\pi H_t (T_m(t,x) - T_f(t,x)) \quad (2.6)$$

où l'index m référence au métal et f au fluide, ρ_m est la densité, C_m est la capacité thermique spécifique et $\dot{V}(t)$ est le débit volumique de la pompe, P_{rc} : pertes thermiques convectifs de tuyau extérieur par unité de longueur, D : est le diamètre du tube de fluide, H_t : est le coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur du tube, η : Rendement du capteur.

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 [21], [23], [83] :

$$A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + \dot{V}(t) \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) = \frac{\eta_{col} G}{\rho_f C_f} I(t) \quad (2.7)$$

II.3 Modèle mathématique du chauffe-eau solaire

Le modèle que nous allons étudier est un modèle de chauffe-eau solaire à circulation forcée par pompe (Fig. 2.1). Ce modèle est constitué d'un capteur solaire, d'un échangeur de chaleur, d'une cuve de stockage et de la tuyauterie dotée des pompes. Dans ce modèle, nous avons deux circuits fermés du fluide caloporteur.

Les paramètres du premier circuit sont les suivantes: T_c est la température du fluide de retour depuis le capteur vers le côté chaud de l'échangeur de chaleur, T_{ec} est la température du fluide de retour depuis le côté chaud de l'échangeur de chaleur vers le capteur et \dot{V}_c est le débit volumique de la partie chaude de l'échangeur de chaleur vers le capteur.

Les paramètres du deuxième circuit sont les suivants: T_s est la température du fluide de retour depuis le réservoir de stockage vers le côté froid de l'échangeur de chaleur, T_{es} est la température du fluide de retour depuis le côté froid de l'échangeur de chaleur au réservoir de stockage, tandis que \dot{V}_s est le débit volumique dans la boucle échangeur-stockage qui est notre variable de commande (m^3/s).

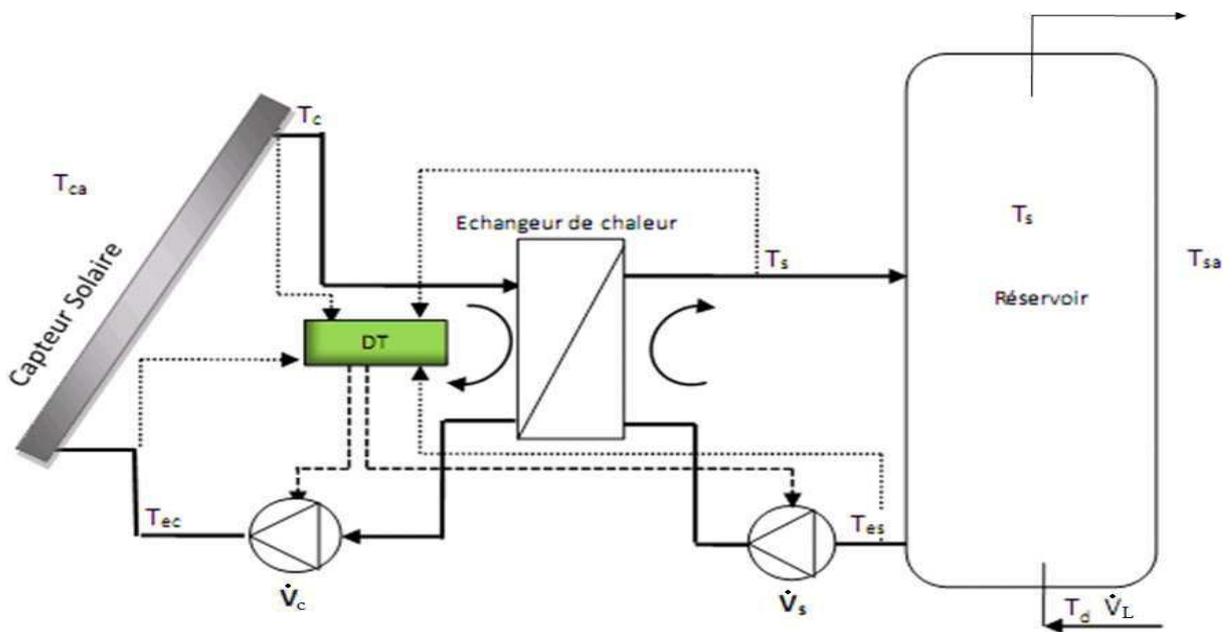


Fig. 2. 1. Schéma synoptique du chauffe-eau solaire.

II.3.2 Modèle mathématique du capteur solaire

Le rayonnement solaire est capté par le panneau solaire et utilisé pour chauffer l'eau. Avec un rayonnement solaire $I(W/m^2)$ couvrant le panneau solaire d'une surface de $A_c (m^2)$, l'énergie reçue par le capteur solaire est donnée par [28] :

$$Q_0 = I \cdot A_c \quad (2.10)$$

Seulement une partie du rayonnement est absorbée par la plaque solaire puisque une partie du rayonnement est réfléchiée vers le ciel. Donc l'équation (2.10) devient:

$$Q_{rec} = \tau \cdot \alpha \cdot I \cdot A_c \quad (2.11)$$

avec : α : Coefficient d'absorption.

τ : Coefficient de transmission.

Il existe également une perte d'énergie à partir de la surface du collecteur solaire lorsque la température du panneau solaire est supérieure à la température de l'environnement. Cette perte est donné par :

$$Q_{per} = U_L \cdot A_c \cdot (T_c - T_{ca}) \quad (2.12)$$

où : U_L : coefficient de transmission globale (de l'eau vers l'air) du capteur en $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$

Par conséquent, l'énergie utile absorbée par le capteur solaire est donné par :

$$Q_{util} = Q_{rec} - Q_{per} \quad (2.13)$$

En remplaçant les équations (2.11) et (2.12) dans (2.13) on obtient :

$$Q_{util} = \tau \cdot \alpha \cdot I \cdot A_c - U_L \cdot (T_c - T_{ca}) = A_c \cdot (\tau \cdot \alpha \cdot I - U_L \cdot (T_c - T_{ca})) \quad (2.14)$$

D'après les résultats expérimentaux, il existe un facteur appelé «facteur de correction (F_R) » déterminé empiriquement. Selon [63], [28], l'énergie utile (Q_u) du capteur est mesurée en multipliant F_R avec Q_{util} :

$$Q_u = F_R \cdot Q_{util} = F_R \cdot A_c \cdot (\tau \cdot \alpha \cdot I - U_L \cdot (T_c - T_{ca})) \quad (2.15)$$

Le rendement d'un capteur solaire est le rapport entre la température utile (Q_u) transmise au fluide et l'irradiation solaire incidente totale sur la surface du collecteur:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_0} \quad (2.16)$$

$$\eta = \frac{F_R \cdot A_c \cdot (\tau \cdot \alpha \cdot I_c - U_L \cdot (T_c - T_a))}{A_c \cdot I_c} = F_R \cdot \tau \cdot \alpha - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (T_c - T_a)}{I_c} \quad (2.17)$$

En réalité, U_L , dans l'équation (2.17) n'est pas constant et selon [63], U_L est donné par l'équation suivante :

$$F_R \cdot U_L = C_1 + C_2 \cdot (T_c - T_a) \quad (2.18)$$

où les coefficients C_1 et C_2 sont déterminés expérimentalement.

En remplaçant l'équation (2.18) dans (2.17) et après les calculs on obtient l'équation suivante :

$$\eta = F_R \cdot \tau \cdot \alpha - \frac{C_1}{I_c} (T_c - T_a) - \frac{C_2}{I_c} \cdot (T_c - T_a)^2 \quad (2.19)$$

De (2.19) on peut conclure l'équation finale du rendement du capteur solaire :

$$\eta = \eta_0 - \frac{C_1}{I_c} \cdot (T_c - T_a) - \frac{C_2}{I_c} \cdot (T_c - T_a)^2 \quad (2.20)$$

avec: $\eta_0 = F_R \cdot \tau \cdot \alpha$

De l'équation (2.20) l'énergie utile devient :

$$Q_u = \eta \cdot A_c \cdot I_c \quad (2.21)$$

$$Q_u = A_c \cdot [\eta_0 \cdot I_c - C_1 \cdot (T_c - T_a) - C_2 \cdot (T_c - T_a)^2] \quad (2.22)$$

L'énergie utile est la quantité de chaleur transmise au fluide caloporteur par le capteur. Elle dépend des caractéristiques du fluide, de sa capacité thermique (Cp_c) de transporter la chaleur et de son débit massique (m_c), elle peut être exprimée par:

$$Q_c = (m_c \cdot Cp_c) \cdot \Delta T = (m_c \cdot Cp_c) \cdot (T_{out}(t) - T_{in}(t)) \quad (2.23)$$

Lorsqu'on intègre le capteur solaire dans le système, le bilan énergétique est:

$$Q_c = Q_u - Q_{ec} \quad (2.24)$$

avec : $Q_{ec} = m_c \cdot Cp_c \cdot (T_c - T_{ec})$ est la quantité d'énergie échangeur-capteur

Donc l'équation (2.24) devient :

$$m_c Cp_c \frac{dT_c}{dt} = A_c \eta_0 \cdot I_c - C_1 (T_c - T_a) - C_2 (T_c - T_a)^2] - \dot{m}_c Cp_c (T_c - T_{ec}) \quad (2.25)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A_c}{m_c \cdot Cp_c} \eta_0 I_c - C_1 (T_c - T_a) - C_2 (T_c - T_a)^2] - \frac{\dot{m}_c}{m_c} (T_c - T_{ec}) \quad (2.26)$$

En utilisant le volume massique ($\dot{V}_c = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c}$), l'équation (2.26) devient :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A_c}{\rho_c \cdot V_c \cdot C_{pc}} \eta_0 \cdot I_c - C_1(T_c - T_a) - C_2(T_c - T_a)^2 - \frac{\dot{V}_c}{V_c}(T_c - T_{ec}) \quad (2.27)$$

L'équation (2.27) représente la température de la sortie du capteur.

II.3.3 Modèle mathématique de l'échangeur

L'échangeur est un dispositif permettant de transférer l'énergie thermique entre deux fluides habituellement séparés par une paroi solide [3], [51]. En fonction du parcours des fluides (Fig. 2.2), les écoulements des fluides peuvent être soit à courant parallèle, soit à contre courant. Dans les deux cas, la quantité de chaleur fournie $Q_{ech}(w)$ est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{ech} = A_{ec} \cdot U_{es} \cdot \Delta T_{ml} \quad (2.28)$$

avec : - A_{ec} : surface d'échange (m^2).

- U_{es} : coefficient d'échange thermique ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

- ΔT_{ml} : l'écart logarithmique moyen.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}} \quad (2.29)$$

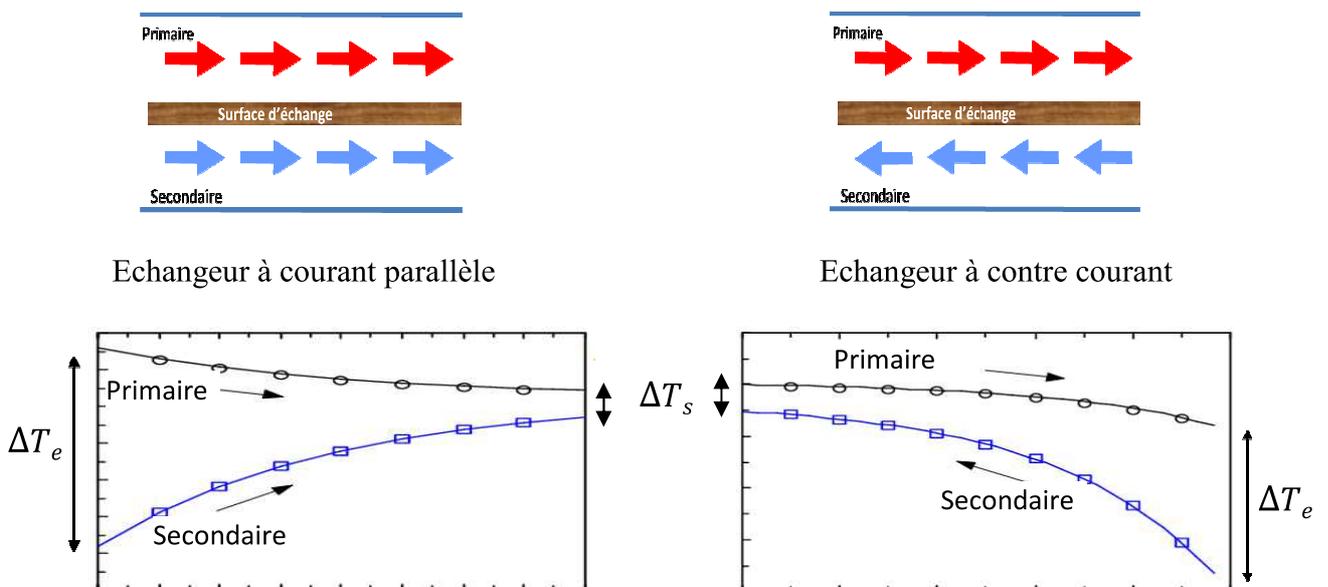


Fig. 2.2 Evolutions des températures le long d'échangeurs

Pour plus de simplicité, on suppose que le fluide est complètement mélangé dans les deux côtés de l'échangeur de chaleur, et Selon [69], [70], l'équation (2.29) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\Delta T_{moy} \simeq \frac{\Delta T_e + \Delta T_s}{2} \quad (2.30)$$

Le bilan thermique dans l'échangeur dans le coté chaud permet d'écrire l'équation suivante :

$$m_c \cdot Cp_c \cdot \frac{dT_{ec}}{dt} = - \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_{ec} - T_c) - A_c \cdot U_{es} \cdot \Delta T_{moy} \quad (2.31)$$

$$\text{avec : } \Delta T_{moy} = \frac{1}{2} (T_c + T_{ec} - T_{se} - T_s) \quad (2.32)$$

En remplaçant $m_c = \rho_c V_c$ dans l'équation (2.31) on obtient :

$$\dot{T}_{ec} = \frac{\dot{V}_c}{V_c} (T_c - T_{ec}) - \frac{A_c \cdot U_{es}}{\rho_c C_c V_c} \frac{1}{2} (T_c + T_{ec} - T_{se} - T_s) \quad (2.33)$$

L'équation (2.33) représente La température d'échangeur-captteur (Coté chaud).

Par conséquent, le bilan thermique d'échangeur dans le coté froid permet d'écrire l'équation suivante :

$$m_s \cdot Cp_s \cdot \frac{dT_{es}}{dt} = - \dot{m}_s \cdot Cp_s \cdot (T_{es} - T_s) + A_s \cdot U_{es} \cdot \Delta T_{moy} \quad (2.34)$$

$$\dot{T}_{es} = \frac{\dot{V}_s}{V_s} (T_s - T_{es}) + \frac{A_s \cdot U_{es}}{\rho_s C_s V_s} \frac{1}{2} (T_c + T_{ec} - T_{se} - T_s) \quad (2.35)$$

L'équation (2.35) représente La température d'échangeur-stockage (Coté froid).

II.3.4 Modèle mathématique de la cuve de stockage

Les paramètres du modèle de stockage sont : T_s est la température de l'eau de la cuve de stockage, T_{sa} est la température de l'air ambiant du réservoir de stockage, T_d est la température de l'eau froide fournie, \dot{V}_L est le débit volumique de l'eau froide et K_s est le coefficient de perte de chaleur de la cuve de stockage.

Avant de mettre en place l'équation du bilan énergétique de la cuve de stockage, on suppose que le fluide est complètement mélangé dans la cuve.

$$Q_s = (m_s \cdot Cp_s) \cdot \frac{dT_s}{dt} = Q_{es} - Q_{td} - Q_{sa} \quad (2.36)$$

$$m_s C_s \frac{dT_s}{dt} = \rho_s C_s \dot{V}_s (T_s - T_{es}) - \rho_s C_s \dot{V}_L Cp_s \cdot (T_s - T_d) - A_s K_s (T_s - T_{sa}) \quad (2.37)$$

$$\dot{T}_s = \frac{\dot{V}_s}{V_s} (T_{es} - T_s) + \frac{\dot{V}_l}{V_s} (T_d - T_s) + \frac{A_s K_s}{\rho_s C_s V_s} (T_{sa} - T_s) \quad (2.38)$$

L'équation (2.38) représente La température de stockage (variable de sortie).

Le modèle final du système des équations mathématiques du chauffe-eau solaire est donné sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{A_c \cdot \eta_0}{\rho_c C_c V_c} I_c - \frac{A_c}{\rho_c C_c V_c} C_1 (x_1 - T_{ca}) - \frac{A_c}{\rho_c C_c V_c} C_2 \cdot (x_1 - T_{ca})^2 - \frac{\dot{V}_c}{V_c} (x_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 = \frac{\dot{V}_c}{V_c} (x_1 - x_2) - \frac{A_c U_{es}}{\rho_c C_c V_c} \frac{1}{2} (x_1 + x_2 - x_3 - x_4) \\ \dot{x}_3 = \frac{\dot{V}_s}{V_s} (x_4 - x_3) + \frac{A_s U_{es}}{\rho_s C_s V_s} \frac{1}{2} (x_1 + x_2 - x_3 - x_4) \\ \dot{x}_4 = \frac{\dot{V}_l}{V_s} (T_d - x_4) + \frac{\dot{V}_s}{V_s} (x_3 - x_4) + \frac{A_s K_s}{\rho_s C_s V_s} (T_{sa} - x_4) \end{cases} \quad (2.39)$$

Le système (2.39) est en effet sous la forme suivante:

$$\dot{X} = f(x, t) + g(x, t) \cdot u \quad (2.40)$$

Tel que : $f(x, t)$: fonction scalaire, $x = \begin{pmatrix} x_1 = T_c \\ x_2 = T_{ec} \\ x_3 = T_{es} \\ x_4 = T_s \end{pmatrix}$: variables des états, $u = \dot{V}_s$: la commande.

$$f(x, t) = \begin{cases} \frac{A_c \cdot \eta_0}{\rho_c C_c V_c} I_c - \frac{A_c}{\rho_c C_c V_c} C_1 (x_1 - T_{ca}) - \frac{A_c}{\rho_c C_c V_c} C_2 \cdot (x_1 - T_{ca})^2 - \frac{\dot{V}_c}{V_c} (x_1 - x_2) \\ \frac{\dot{V}_c}{V_c} (x_1 - x_2) - \frac{A_c U_{es}}{\rho_c C_c V_c} \frac{1}{2} (x_1 + x_2 - x_3 - x_4) \\ \frac{A_s U_{es}}{\rho_s C_s V_s} \frac{1}{2} (x_1 + x_2 - x_3 - x_4) \\ \frac{\dot{V}_l}{V_s} (T_d - x_4) + \frac{A_s K_s}{\rho_s C_s V_s} (T_{sa} - x_4) \end{cases} \quad (2.41)$$

$$g(x, t) = [0 \ 0 \ \frac{1}{V_s} (x_4 - x_3) \ \frac{1}{V_s} (x_3 - x_4)]^T \quad (2.42)$$

Pour rendre le contrôle de notre système non linéaire (2.39) simple, une linéarisation est nécessaire. Elle sera étudiée dans la section suivante.

II.4 Linéarisation du modèle non linéaire du système de chauffe eau solaire

II.4.1 Points d'équilibres

Les points d'équilibres de notre système non linéaire sont obtenus à partir de la résolution du système d'équation (2.39). Les valeurs de linéarisation choisies sont présentées dans le tableau 2.1 et les restes des valeurs seront calculés en fixant la dérivée à zéro dans les équations non linéaires (2.39), c'est-à-dire à l'état d'équilibre.

Désignation des lettres	Valeur (résolution de systèmes d'équations)	Unité
$x_1 = T_c$	77.96	°C
$x_2 = T_{ec}$	75.82	°C
$x_3 = T_{es}$	70.86	°C
$x_4 = T_s$	61.12	°C
\dot{V}_c	6×10^{-5}	m ³ /s
\dot{V}_s	3×10^{-5}	m ³ /s

Tableau 2.1 Points d'équilibres

II.4.2 Linéarisation

Dans cette section, nous montrons comment effectuer la linéarisation des systèmes décrits par les équations différentielles non linéaires. La procédure instituée est basée sur le développement en série de Taylor [30], sur la connaissance des trajectoires nominales du système et des entrées du système nominal.

Une des raisons pour rapprocher le système non linéaire (2.39) par un modèle linéaire de la forme (2.46) a pour objectif de rendre le contrôle de notre système non linéaire plus simple, systématique et effectuer une analyse de la simulation et également la stabilité du système.

Notons que le modèle linéarisé n'est valable que lorsque le système fonctionne dans une portée suffisamment petite autour d'un point d'équilibre.

Notre système non linéaire est de la forme suivante:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U, t) \quad (2.43)$$

Où X : variables d'états et U : vecteur des entrées.

On suppose que le mouvement du système non linéaire se trouve dans le voisinage de $X = X_0$, et $U = U_0$, et d'examiner les effets de petites perturbations autour de ce point ($X = X_0 + \Delta x$, $U = U_0 + \Delta u$), l'équation (2.43) devient:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= f(X_0 + \Delta x, U_0 + \Delta u, t) \\ &\cong f(X_0, U_0, t) + \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{(X_0, U_0, t)} \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(X_0, U_0, t)} \cdot \Delta u \end{aligned} \quad (2.44)$$

où les termes du second degré et d'ordre supérieur de x et u ont été négligés.

$\left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{(X_0, U_0, t)}$ et $\left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(X_0, U_0, t)}$ désignent des matrices de dérivées partielles, évalués à (X_0, U_0, t) .

Notons que ces matrices sont appelées matrices **Jacobéennes** sont désignées par A , B . Par conséquent, nous pouvons réécrire le modèle linéaire comme suit:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot x + B \cdot u + f(X_0, U_0, t) \quad (2.45)$$

Si (X_0, U_0, t) est un point d'équilibre (c'est à dire un état d'équilibre possible) à l'instant t , il est clair que $f(X_0, U_0, t) = 0$.

D'où on conclue le modèle simplifié qui est le modèle d'espace d'état linéaire, très largement utilisé dans les systèmes et la théorie du contrôle:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x + B \cdot u \quad (2.46)$$

$$\text{où: } A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{pmatrix} ; \quad u = \dot{V}_S$$

avec :

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = - \left(\frac{A_c C_1 + A_c C_2 \cdot 2 \cdot (x_1 - T_{ca})}{C_{col}} \right) - \left(\frac{\dot{V}_c}{V_c} \right); & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\dot{V}_c}{V_c}; & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} = \frac{\partial f_1}{\partial x_4} = 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \left(f_c \frac{\dot{V}_c}{2C_{cs}} \right) - \left(A_h \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); & & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \left(A_h \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = - \left(\rho_c C_c \frac{u_1}{C_{cs}} \right) - \left(A_h \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); & & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} = \left(A_h \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = \left(A_s \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = \left(A_s \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = - \left(f_s \frac{u}{C_{cs}} \right) - \left(A_s \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} = - \left(f_s \frac{u}{C_{cs}} \right) - \left(A_s \frac{U_{ex}}{2C_{cs}} \right); \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} = \frac{\partial f_4}{\partial x_2} = 0 & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} = - \left(\frac{1}{V_s} \right); & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} = - \left(\frac{V_L}{V_s} \right) - \left(\frac{u}{V_s} \right) - \left(A_s \frac{k_s}{C_{st}} \right). \end{cases}$$

$$C_{col} = \rho_c C_c V_c, \quad C_{st} = \rho_s C_s V_s, \quad \rho_c C_c V_c \quad C_{cs} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_c C_c V_c + \rho_s C_s V_s),$$

$$f_c = \rho_c C_c, \quad f_s = \rho_s C_s.$$

$$B = \left(\frac{\partial g_1}{\partial u}, \frac{\partial g_2}{\partial u}, \frac{\partial g_3}{\partial u}, \frac{\partial g_4}{\partial u} \right)^T = \left(0, 0, \frac{\rho_s C_s \cdot (x_4 - x_3)}{0.5 \cdot (\rho_c C_c V_c + \rho_s C_s V_s)}, - \frac{(x_4 - x_3)}{V_s} \right)^T$$

Les sorties d'un système non linéaire sont également déterminées de la même manière précédente :

$$Y = g(x, t)$$

Où : g est une fonction non-linéaire, supposons que : $Y = g(X_0, t)$ et $Y = Y_0 + \Delta y$.

$$Y = g(X_0 + \Delta x, t)$$

$$\cong g(X_0, t) + \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{(X_0, t)} \cdot \Delta x$$

$$= Y_0 + C_y \cdot x$$

Au tour du point d'équilibre $Y_0 = 0$, d'où : $Y = C_y \cdot x$

$$\text{avec :} \quad C_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

II.5 Résultats de Simulation

II.5.1 Simulation en boucle ouverte

Pour valider notre modèle, nous avons d'abord simulé notre système non linéaire (2.39) en boucle ouverte afin de vérifier les paramètres retenus. Le système est simulé sous Matlab et avec les paramètres et les conditions de simulations suivantes :

$T_{ca} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{sa} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_d = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $A_c = 4 \text{ m}^2$, $V_s = 0.2 \text{ m}^3$, le débit de l'eau entre l'échangeur et le capteur solaire est fixe $\dot{V}_c = 6.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_l = 0.7.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. $\rho_c = 1034$; $C_c = 3623$, $\rho_s = 980$; $C_s = 4185$.

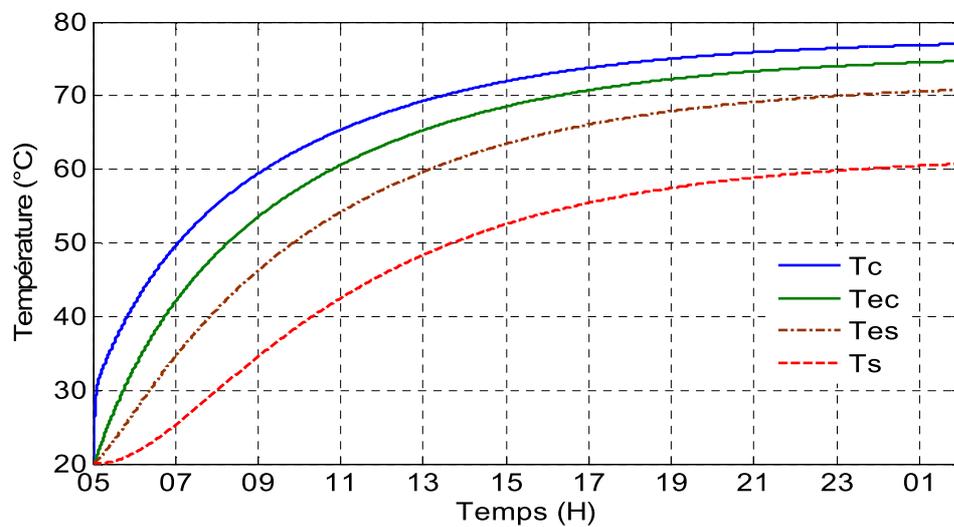


Fig. 2.3 Sortie des variables des états du Chauffe-eau solaire à Imoy =800W/m².

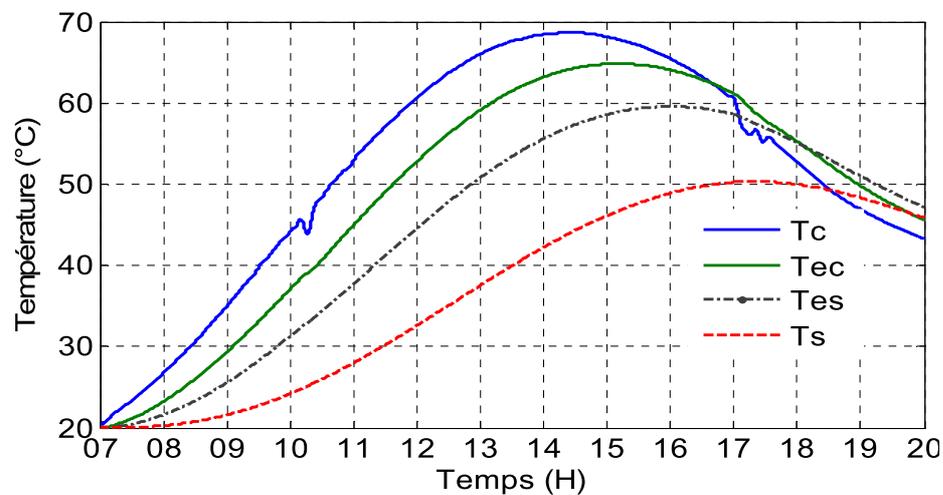


Fig. 2.4 Sortie des variables des états du Chauffe-eau solaire du 23/9/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

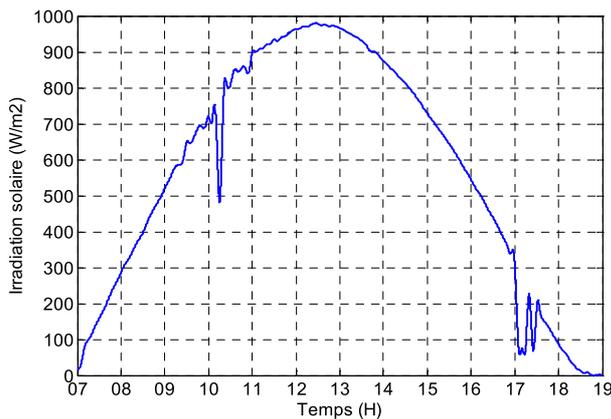


Fig 2.5 L'irradiation solaire du 23/09/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

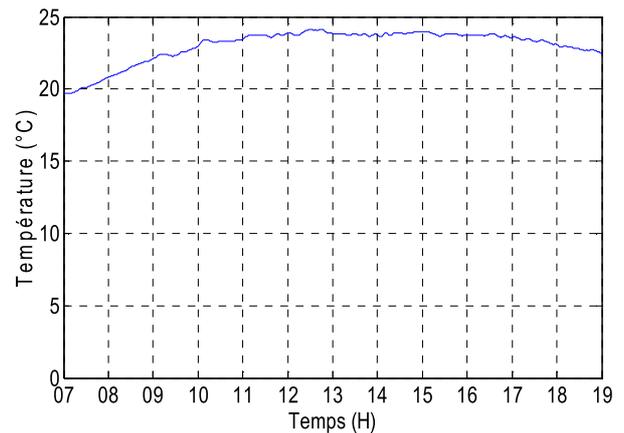


Fig 2.6 Température ambiante du 23/09/2013 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

La figure 2.3 montre les différentes températures au niveau de la sortie du capteur solaire (T_c), de l'échangeur vers le capteur (T_{ec}), de l'échangeur vers le ballon stockage (T_{es}) et la température (utile) de la sortie du réservoir (T_s). La simulation est effectuée avec une irradiation solaire constante ($I = 800 \text{ W/m}^2$). Nous remarquons que notre système est stable et tous les états convergent vers des valeurs fixes.

Afin de tester notre modèle en boucle ouverte dans une situation proche de la réalité, nous avons choisi la journée ensoleillée (Fig. 2.5) du 23/09/2013 au niveau du site de l'UDES (Bou-Ismaïl W.Tipaza). Nous avons constaté que l'irradiation solaire ne dépasse pas 300 w/m^2 avant 08 heures du matin et augmente jusqu'à son maximum 979 w/m^2 à 12h 30min. C'est une journée bien ensoleillée malgré une petite perturbation d'ensoleillement. La température ambiante du même site et durant la même journée est représenté par la figure 2.6. Nous remarquons que la température ambiante varie entre 20°C et 24°C durant toute la journée. Pour cela nous fixons la température à 20°C comme une valeur initiale pour notre simulation. La température au niveau de sortie du capteur solaire (Fig.2.4) est liée directement, à l'irradiation solaire. Après 17h, elle commence à diminuer. Par contre, la température au niveau du ballon de stockage augmente lentement à cause de la caractéristique thermique de l'eau, puis, elle diminue légèrement à cause de l'isolement du réservoir.

En comparant les résultats de simulations (Fig. 2.3 et 2.4) avec d'autres travaux expérimentaux [45], [5], nous remarquons que les résultats obtenus avec notre modèle non linéaire (2.39) sont raisonnables.

II.5.2 Simulation de la commande PI du chauffe-eau solaire

A partir, de la réponse indicielle en boucle fermée du système, une synthèse graphique du régulateur PI a été effectuée, avec les mêmes conditions que précédemment. Les valeurs obtenues pour le régulateur PI sont les suivantes : $K_p = 6 \times 10^{-5}$, $K_i = 1.5 \times 10^{-5}$

Le schéma block de la commande avec le régulateur PI est représenté par la figure (2.7).

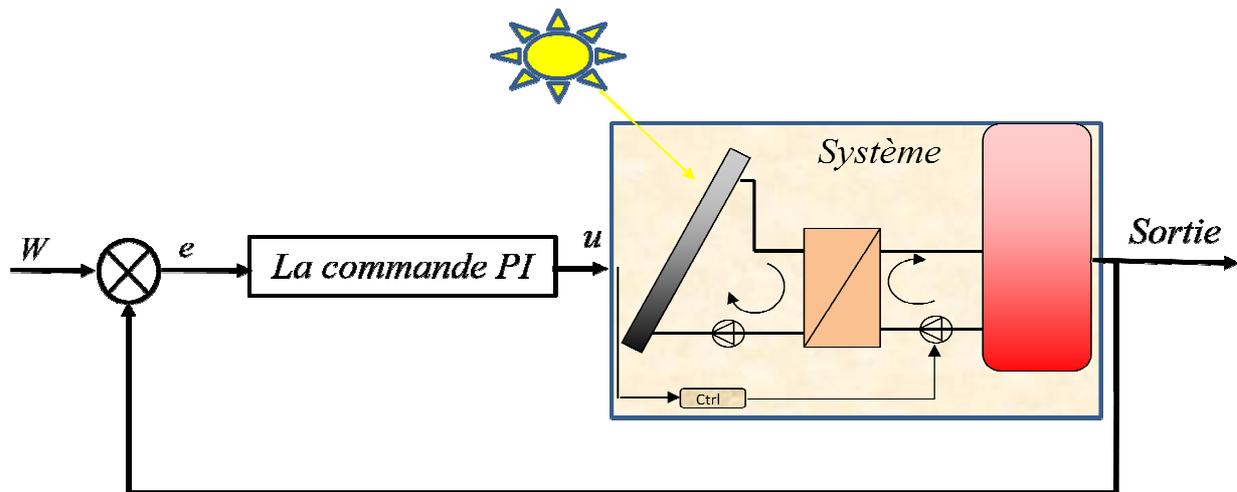


Fig. 2.7 Schéma bloc de la commande avec le régulateur PI

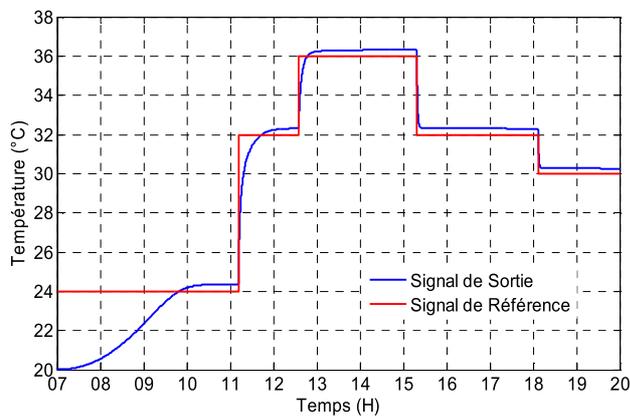


Fig 2.8 Réponse avec le régulateur PI

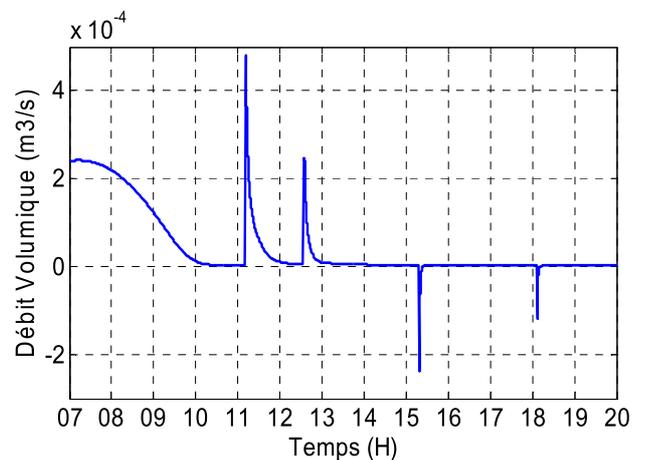


Fig 2.9 Signal de commande (u) du régulateur PI

Nous pouvons constater que le signal de sortie suit bien le signal de référence et qu'un simple régulateur PI pourrait être suffisant. Mais vu les perturbations instantanées du rayonnement solaire, les variations paramétriques du système que nous venons de voir dans les chapitres suivants et la limitation physique de l'organe de contrôle ; le régulateur PI devient

insuffisant pour un contrôle robuste, cela, nous orientons à proposer d'autres contrôleurs robustes comme la commande prédictive où la commande par mode de glissement.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un modèle mathématique du chauffe-eau solaire qui décrit le comportement d'un système non linéaire, cependant, une linéarisation d'un tel système est nécessaire pour construire un contrôleur. La linéarisation nous a permis d'étudier la stabilité du système.

Finalement, nous avons simulé le modèle en boucle ouverte pour évaluer le comportement de notre système ainsi que pour valider notre résultat. Puis, en boucle fermée avec simple régulateur PI, ce qui nous a montré les performances acceptables mais, qui restent insuffisantes devant les perturbations et les contraintes physiques. Cela nous a orienté à proposer d'autres contrôleurs simples et robustes comme la commande prédictive étudiée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Commande prédictive

du chauffe-eau solaire

III.1 Introduction

L'utilisation du chauffe-eau solaire dans de nombreux établissements résidentiels, commerciaux, institutionnels... nécessite une régulation de la température, pour économiser l'énergie et garder la température de l'eau à une valeur donnée.

Le chauffe-eau solaire individuel peut fonctionner sans commande (thermosiphon) mais, dans le cas d'une installation collective où la consommation de l'eau est très importante (régime forcé), il faut une régulation qui permet de régler et donner la température voulue et économiser l'énergie.

La commande du chauffe-eau solaire, au début de son utilisation, était basée sur la commande « tout ou rien ». De plus, même actuellement, certaines publications citent encore cette commande [53].

Dans ce chapitre, nous expliquerons en détail le principe de la commande prédictive, puis nous nous intéresserons, en particulier, à un type de commande prédictive qui est la commande prédictive généralisée non linéaire continue pour l'appliquer au chauffe-eau solaire.

III.2 Bref historique de la commande prédictive dans le domaine de solaire thermique

La commande prédictive MPC (Model Predictive Control) est une méthode relativement récente, elle n'a connu un réel essor dans l'industrie que depuis le milieu des années 80.

Actuellement, cette approche représente l'une des techniques de commandes les plus avancées en automatique notamment pour les systèmes lents comme la dynamique thermique de l'eau.

La commande prédictive a débuté dans les années 60 avec la commande optimale [52] et a connu le vrai départ dans les années 70 avec les travaux de Richalet [31]. Ce dernier avait proposé le modèle prédictif de contrôle heuristique (MPHC) [32]. Plus tard, cette méthode a été connue comme le contrôle du modèle algorithmique.

En 1987, la procédure GPC (Generalised Predictive Control) a été développée [18 et 19]. Cette méthode utilise les idées de GMV (Generalized Minimum Variance).

Le travail de Morari [48] permet de construire la commande prédictive dans l'espace d'état qui permet la génération de problèmes plus complexes, par exemple des systèmes présentant des perturbations non-déterministes et le bruit sur les variables mesurées.

La commande prédictive dans le domaine du solaire thermique est utilisée beaucoup plus dans la commande des concentrateurs cylindro-parabolique. Le travail [10] est le premier

application de la commande prédictive généralisée (GPC) du clack(1987) appliquée au domaine du solaire thermique. On peut citer aussi [17 et 6] qui ont utilisé GPC pour le contrôle du solaire thermique où il a ajouté à son modèle l'échangeur thermique.

III.3 Principe de la commande prédictive

Le principe de la commande prédictive, ou commande à horizon glissant, est basée sur la notion essentielle de prédiction; d'où son nom. Il faut prédire le comportement futur du système afin de pouvoir le contrôler par anticipation [47].

Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du processus commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de commande à modèle interne. Elle est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants ou des réponses inverses et subissent de nombreuses perturbations.

La méthodologie de l'ensemble des contrôleurs appartenant à la famille la commande prédictive est caractérisée par la stratégie suivante, représentée dans la Figure 3.1:

- 1- Utilisation d'un modèle pour prédire les sorties du procédé à des instants futurs.
- 2- A chaque instant d'échantillonnage k , l'horizon de prédiction (N_p) est déplacé vers le futur et seule la première valeur des commandes calculées est effectivement appliquée au système (notion d'horizon fuyant) [81,82].
- 3- La séquence de commande est déterminée en minimisant un critère de performances qui permet d'assurer la poursuite de la consigne choisie. Le critère est une fonction quadratique des erreurs entre les sorties prédites et la trajectoire de référence.
- 4- La solution déterminée par optimisation sera ensuite appliquée au système réel, à l'instant suivant $k+1$ où la procédure complète est répétée. Ceci permet d'obtenir une valeur réactualisée pour la commande en fonction des mesures les plus récentes en utilisant le concept de l'horizon glissant.

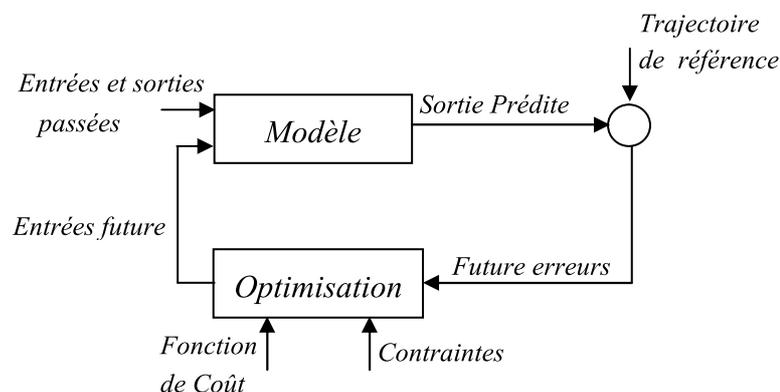


Fig. 3.1 Structure de base de la commande prédictive [12]

III.4 Eléments de la commande prédictive

III.4.1 Modèle du système

Afin que nous puissions prédire le comportement d'un système à chaque instant futur, il faut posséder un modèle mathématique qui décrit la dynamique de ce dernier.

Le modèle du système est la partie la plus importante de la commande prédictive car la performance de l'unité de commande prédictive basée sur un modèle dépend de la précision du modèle du système.

Dans la plupart des cas, il n'est pas utile de construire des modèles complexes tandis que les modèles simples permettent d'atteindre l'objectif souhaité cela, pour éviter de répéter les calculs à chaque instant de l'intervalle de l'horizon de commande (N_c).

Il existe différentes formes pour le modèle utilisé dans une commande prédictive mais, ces derniers doivent être toujours de nature discrète puisque la commande prédictive est une commande numérique.

Les modèles les plus répandus sont : modèle d'état, modèle des entrées-sorties, modèle réponse impersonnel(FIR), réponse indicielle, équation aux différences...etc.

III.4.2 L'horizon glissant

Le principe de l'horizon glissant est défini comme : la trajectoire optimale du futur signal de commande complètement décrite à l'intérieur de l'intervalle d'horizon en mouvement. L'entrée de commande réelle du procédé ne prend que le premier échantillon du signal de commande, tout en négligeant le reste de la trajectoire.

A chaque moment du temps d'horizon avancé, le contrôleur calcule et prédit le comportement futur du système; c'est-à-dire à chaque temps écoulé le contrôleur ajoute à sa base de données une nouvelle information à partir de l'instant le plus avancé pour l'avenir. L'idée est illustrée dans la figure 3.2.

L'horizon de prédiction (N_p) définit le nombre d'intervalles de contrôle sur lequel le contrôleur prédit ses sorties lors du calcul des mouvements du contrôleur. L'horizon de contrôle (N_c) définit le nombre de coups calculés. L'horizon de prédiction (N_p) est toujours supérieur à l'horizon de commande. Il ne doit, en aucun cas, avoir une valeur inférieure au temps nécessaire de calcul de la commande.

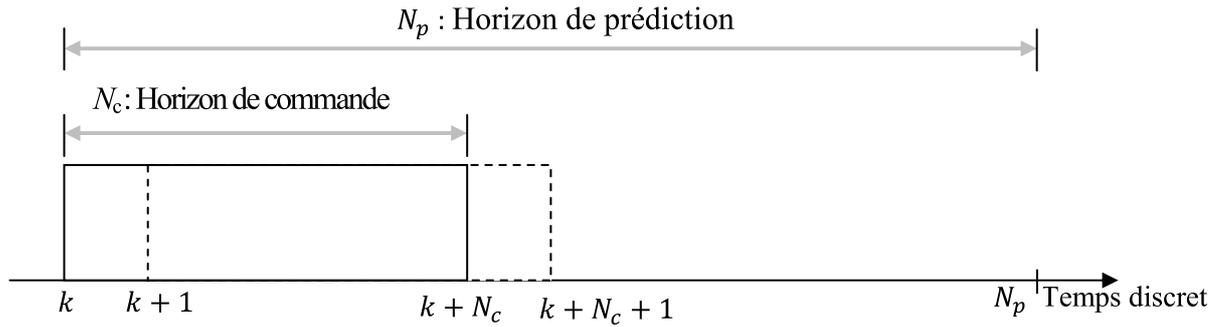


Fig. 3.2 Horizon glissant.

III.4.3 Fonction du coût

L'optimisation est la recherche de la séquence de valeur de contrôle qui minimise ou maximise une fonction du coût particulier.

La fonction du coût est une loi de commande qui permet de contrôler la prédiction et de calculer sa valeur à chaque instant dans le temps réel. Le but recherché est d'assurer la poursuite de la consigne désirée $w_{(k)}$ avec un minimum d'effort du contrôleur.

Le calcul de la commande prédictive résulte de la minimisation d'un critère proposé par Clarke [60] dans le cas mono variable (SISO) en 1987. Le critère à minimiser est:

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{i=N_1}^{N_p} \|w_{(k+i)} - \hat{y}_{(k+i)}\|_2^2 + \lambda \cdot \sum_{i=0}^{N_u-1} \|\Delta u_{(k+i)}\|_2^2 \\
 &= \sum_{i=N_1}^{N_p} \|e_{(k+i)}\|_2^2 + \lambda \cdot \sum_{i=0}^{N_u-1} \|\Delta u_{(k+i)}\|_2^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

avec:

- $\hat{y}_{(k+i)}$: prédiction optimale à l'instant $(k + i)$.
- $w_{(k)}$: consigne
- λ : facteur de pondération sur la commande.
- N_1 : l'instant du début de la prédiction.
- $\Delta u_{(k+i)} = u_{(k+i)} - u_{(k+i-1)}$

Le calcul de la valeur de l'optimisation de critère à minimiser (fonction du coût) est exprimé dans la relation suivante:

$$\min_{\Delta u_{(k|k+1)}} = \|e_{(k|k+1)}\|_2^2 + \lambda \cdot \|\Delta u_{(k|k+1)}\|_2^2 \tag{3.2}$$

La solution de cette fonction sera détaillée, plus tard, lorsque nous aborderons la commande prédictive généralisée.

III.4.4 Contraintes

La caractéristique la plus importante de la commande prédictive offre la possibilité de gérer les contraintes et traiter les limites des systèmes de contrôle.

Les contraintes caractérisent généralement les limitations physiques sur la commande. Dans la plupart des systèmes, nous trouvons des restrictions sur les limites du système supérieur et les limites d'inférieurs sur l'amplitude du signal de commande qui a la forme suivante:

$$u_{min} \leq u_i \leq u_{max} \quad (3.3)$$

De même les restrictions sur la vitesse de variation du signal de commande des entrées du système :

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u_i \leq \Delta u_{max} \quad (3.4)$$

avec: $\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$

On peut trouver, aussi, des contraintes sur les amplitudes des sorties :

$$y_{i_{min}} \leq y_i \leq y_{i_{max}} \quad (3.5)$$

Les restrictions sur l'augmentation du signal de sortie peuvent être exprimées au moyen de l'inégalité suivante:

$$\Delta y_{min} \leq \Delta y_k \leq \Delta y_{max} \quad (3.6)$$

avec: $\Delta y(k) = y(k) - y(k - 1)$

III.4.5 Prédiction

Dans cette section, nous aborderons comment utiliser le modèle d'état pour la prédiction des sorties futures du système.

4.5.1 La prédiction en utilisant l'équation d'état

L'utilisation des équations d'états pour la prédiction est simple et directe. Pour obtenir la future sortie à l'instant $(k + 1)$, en utilisant l'équation d'état discrète, en effectuant un décalage d'un échantillon.

Notre modèle sera sous la forme suivante:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot u_k \\ y_{k+1} = C \cdot x_{k+1} \end{cases} \quad (3.7)$$

A l'instant $(k + 2)$, le modèle devient:

$$\begin{cases} x_{k+2} = A \cdot x_{k+1} + B \cdot u_{k+1} \\ y_{k+2} = C \cdot x_{k+2} \end{cases} \quad (3.8)$$

On remplaçant la valeur de x_{k+1} de (3.7) dans (3.8) on obtient :

$$\begin{cases} x_{k+2} = A^2 \cdot x_k + AB \cdot u_k + B \cdot u_{k+1} \\ y_{k+2} = C \cdot x_{k+2} \end{cases} \quad (3.9)$$

Et à l'instant $(k + 3)$ on obtient l'équation suivante :

$$\begin{cases} x_{k+3} = A^2 \cdot x_{k+1} + AB \cdot u_{k+1} + B \cdot u_{k+2} \\ y_{k+3} = C \cdot x_{k+3} \end{cases} \quad (3.10)$$

De la même manière en remplaçant la valeur de x_{k+1} de (3.7) dans (3.10) on obtient:

$$\begin{cases} x_{k+3} = A^2 \cdot (A \cdot x_k + B \cdot u_k) + AB \cdot u_{k+1} + B \cdot u_{k+2} \\ y_{k+3} = C \cdot x_{k+3} \end{cases} \quad (3.11)$$

D'où:

$$\begin{cases} x_{k+3} = A^3 \cdot x_k + A^2 B \cdot u_k + AB \cdot u_{k+1} + B \cdot u_{k+2} \\ y_{k+3} = C \cdot (A^3 \cdot x_k + A^2 B \cdot u_k + AB \cdot u_{k+1} + B \cdot u_{k+2}) \end{cases} \quad (3.12)$$

Donc à l'instant n , la forme devient:

$$\begin{cases} x_{k+n} = A^n \cdot x_k + A^{n-1} B \cdot u_k + A^{n-2} B \cdot u_{k+1} + \dots + B \cdot u_{k+n-1} \\ y_{k+n} = C \cdot x_{k+n} = C \cdot (A^n \cdot x_k + A^{n-1} B \cdot u_k + A^{n-2} B \cdot u_{k+1} + \dots + B \cdot u_{k+n-1}) \end{cases} \quad (3.13)$$

D'où on peut prédire un vecteur de prédiction sur l'horizon de prédiction n_y de la forme suivante :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ x_{k+3} \\ \vdots \\ x_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{x_{(k|k+1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{n_y} \end{bmatrix}}_{P_x} \cdot x_k + \underbrace{\begin{bmatrix} B & 0 & 0 & \dots \\ AB & B & 0 & \dots \\ A^2 B & AB & B & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{n_y-1} B & A^{n_y-2} B & A^{n_y-3} B & \dots \end{bmatrix}}_{H_x} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+n_y-1} \end{bmatrix}}_{u_{(k|k-1)}} \quad (3.14)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ y_{k+3} \\ \vdots \\ y_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{x_{(k|k+1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{n_y} \end{bmatrix}}_P \cdot x_k + \underbrace{\begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots \\ CAB & B & 0 & \dots \\ CA^2 B & AB & B & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1} B & CA^{n_y-2} B & CA^{n_y-3} B & \dots \end{bmatrix}}_H \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+n_y-1} \end{bmatrix}}_{u_{(k|k-1)}} \quad (3.15)$$

On peut simplifier les matrices (3.14) et (3.15) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} x_{(k|k+1)} = P_x \cdot x_k + H_x \cdot u_{(k|k-1)} \\ y_{(k|k+1)} = P \cdot x_k + H \cdot u_{(k|k-1)} \end{cases} \quad (3.16)$$

III.5 La commande prédictive généralisée (GPC)

La commande prédictive généralisée est largement utilisée dans le domaine industriel et surtout, dans le contrôle du solaire thermique [10]. Elle a été développée par Clarke en 1987. Cependant, aucune contrainte, ni sur l'entrée ni sur la sortie, n'est prise en compte dans cette méthode. Il a fallu attendre jusqu'à 1993 avec les travaux de Camacho [11], pour que les contraintes soient prises en compte dans la GPC [55]. Cette commande (GPC) est devenue l'un des algorithmes de commande prédictive les plus populaires [20, 54 et 87].

Les éléments essentiels de la commande prédictive généralisée sont : le modèle de prédiction, la fonction du coût et les contraintes.

III.5.1 Modèle GPC

Parmi les modèles les plus utilisés, le modèle CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) qui ouvre une vaste gamme pour la modélisation des différents cas en modifiant ses paramètres.

Le modèle CARIMA, utilisé généralement pour les systèmes à une seule entrée et une seule sortie (SISO), est de la forme suivante :

$$A(q^{-1}) \cdot y_t = B(q^{-1}) \cdot u_{t-1} + \frac{C(q^{-1})}{\Delta q(q^{-1})} \cdot \xi_t \quad (3.17)$$

avec:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \end{aligned} \quad (3.18)$$

n_a = Degré de polynôme $A(q^{-1})$

n_b = Degré de polynôme $B(q^{-1})$

n_c = Degré de polynôme $C(q^{-1})$

$\Delta q = 1 - q^{-1}$: opérateur de retard et ξ : bruit blanc centré.

Ce modèle permet la détermination du prédicteur optimal de la sortie du système dans le futur. D'une façon générale, ce prédicteur est très important dans la méthodologie des commandes prédictives.

Pour simplifier le développement de l'algorithme, nous posons. $C(q^{-1}) = 1$ [19].

III.5.2 Prédicteur optimal

Le modèle précédent peut être mis sous la forme suivante à l'instant $(t+j)$:

$$y(t+j) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \cdot u(t+j-1) + \frac{1}{A(q^{-1})\Delta(q^{-1})} \cdot \xi(t+j) \quad (3.19)$$

En multipliant (3.19) par : $E_j(q^{-1}) \cdot A(q^{-1}) \cdot \Delta(q^{-1})$

On obtient :

$$E_j(q^{-1}) \cdot A(q^{-1}) \cdot \Delta(q^{-1}) \cdot y(t+j) = E_j(q^{-1}) \cdot B(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) u(t+j-1) + E_j(q^{-1}) \xi(t+j) \quad (3.20)$$

Pour expliciter analytiquement cette décomposition, on introduit l'identité polynomiale suivante :

$$1 = E_j(q^{-1}) \cdot A(q^{-1}) \cdot \Delta(q^{-1}) + F_j(q^{-1}) \quad (3.21)$$

avec : $E_j(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{j-1} e_j q^{-i}$, $F_j(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_a} f_j q^{-i}$, $G_j(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{j-1} G_j q^{-i}$ sont des polynômes qui représentent respectivement le passé, le présent et le future.

Cette équation appelée équation **Diophantienne** est obtenue à l'aide de l'algorithme d'EUCLIDE [84] qui permet d'effectuer la division de 1 par le polynôme jusqu'à l'ordre j .

L'équation (3.20) devient :

$$y(t+j) = E_j(q^{-1}) \cdot B(q^{-1}) \cdot \Delta u(t+j-1) + F_j(q^{-1}) \cdot y(t) + E_j(q^{-1}) \cdot \xi(t+j) \quad (3.22)$$

Les termes de bruit dans l'équation (3.22) sont tous dans l'instant $(t+j)$ car le degré de polynôme $E_j(q^{-1})$ est $(j-1)$.

Le prédicteur optimal compte tenu des informations disponibles à l'instant t se présente sous la forme suivante :

$$\hat{y}(t+j|t) = G_j(q^{-1}) \cdot \Delta u(t+j-1) + F_j(q^{-1}) \cdot y(t) \quad (3.23)$$

avec:

$$G_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) \cdot B(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{j-1} G_j q^{-i}$$

$$F_j(q^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1} q^{-1} + \dots + f_{j,1} q^{-n_a}$$

L'expression de la sortie à l'instant $(t + j)$ s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t+1|t) \\ \hat{y}(t+2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+j|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_0 & 0 & \cdots & 0 \\ G_1 & G_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{j-1} & G_{j-2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & G_0 & \vdots \\ G_{N-1} & G_{N-2} & \cdots & G_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+j-1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_j \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Le prédicteur de la GPC est représenté sous la forme matricielle suivante :

$$\hat{y} = G \cdot \tilde{u} + f \quad (3.25)$$

avec:

$\hat{y} = [\hat{y}(t+1), \hat{y}(t+2), \dots, \hat{y}(t+N)]^T$: Le vecteur des prédictions.

$\tilde{u} = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N-1)]^T$: Le vecteur des incréments (variations) des commandes.

$f = [f(t+1), f(t+2), \dots, f(t+N)]^T$: Le vecteur des prédictions de la réponse libre.

III.5.3 Fonction du coût

Après avoir atteint ce stade où nous pouvons prédire les valeurs des futures sorties, nous pouvons maintenant passer à la phase d'établir d'une loi de commande qui sera capable de contrôler la prédiction et de calculer sa valeur à chaque instant dans le temps réel. Le but recherché est d'assurer la poursuite de la consigne désirée (k) avec un minimum d'effort.

Le calcul de la commande dans la GPC résulte de la minimisation d'un critère proposé par Clarke [18]. Le critère à minimiser est:

$$J(N_1, N_2) = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \cdot [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (3.26)$$

tel que:

- $y(t+j)$: la prédiction optimale à l'instant $(t+j)$.
- N_1 : horizon de prédiction minimal sur la sortie.
- N_2 : horizon de prédiction maximal sur la sortie.
- N_u : horizon de prédiction sur la commande.
- $\lambda(j)$: coefficient de pondération sur la commande.

Ce critère comprend donc un terme quadratique sur l'erreur entre la sortie et la valeur désirée et l'incrément de la commande. Sa minimisation analytique fournit la séquence des commandes futures dont seule la première sera effectivement appliquée.

Nous pouvons aisément donner le critère quadratique de la commande sous sa forme matricielle en utilisant l'équation (3.26):

$$J(u, t) = [Gu + \hat{y}_1 - w]^T \cdot [Gu + \hat{y}_1 - w] + \lambda \cdot u^T \cdot u \quad (3.27)$$

La solution optimale du critère (3.27) précédemment soulevé dans les équations (3.24) et (3.25) est obtenue en effectuant la dérivation du critère sous sa forme matricielle par rapport à la commande u constituée dans son vecteur d'incrément.

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 2 \cdot [G^T \cdot G + \lambda \cdot I_{Nu}] \cdot u + 2 \cdot G^T \cdot (\hat{y}_1 - w) \quad (3.28)$$

$$\text{La minimisation du critère (3.27) est : } \text{Min}(J) \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (3.29)$$

Donc la solution optimale sera :

$$u_{opt} = [G^T \cdot G + \lambda \cdot I_{Nu}]^{-1} \cdot G^T \cdot (w - \hat{y}_1) \quad (3.30)$$

Avec : $\text{Dim}(G^T \cdot G) = N_u \cdot N_u$

III.5.4 Contraintes

Dans la pratique, tous les systèmes sont soumis à des contraintes. Il existe des contraintes pour des raisons de construction et de sécurité et d'autres pour les limites des actionneurs d'entrées et de sorties (vitesse de la vanne).

Le but principal de la GPC est d'appliquer le meilleur contrôle possible du signal en diminuant l'expression (3.27). Les contraintes agissant sur un processus peuvent être initiées par des limites d'amplitude dans le signal de commande, des limites de vitesse de balayage du dispositif d'actionnement et des limites sur les signaux de sortie [40-42]. Elles peuvent être décrites respectivement par :

- $u_{min} \leq u_i \leq u_{max}$
- $\Delta u_{min} \leq \Delta u_i \leq \Delta u_{max}$
- $y_{max} \leq y_i \leq y_{min}$

La solution optimale de l'équation (3.27) est exprimée sous la forme suivante:

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T \cdot H \cdot u + b^T \cdot u + f_0 \quad (3.31)$$

avec :

$$f_0 = (f_{N_{12}} - w)^T (f_{N_{12}} - w) \quad b^T = 2 (f_{N_{12}} - w)^T G_{N_{123}}$$

$$H = 2 (G_{N_{123}}^T G_{N_{123}} + \lambda I)$$

La formulation de la commande prédictive peut être exprimée comme un problème de programmation quadratique avec :

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T \cdot H \cdot u + b^T \cdot u \quad (3.32)$$

Comme la fonction à optimiser sous les contraintes suivantes: $A_{pq} \cdot u \leq b_c$.

f_0 est éliminée dans l'équation (3.32) car à chaque étape de l'optimisation, f_0 est une constante dont la valeur ne dépend que de u . A_{pq} et b_c qui sont respectivement: la matrice et le vecteur de taille $6N_u \times m$ et $6N_u$ comme suit:

$$A_{pq} = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ I \\ -I \\ G_{N_{123}} \\ -G_{N_{123}} \end{bmatrix} \quad b_c = \begin{bmatrix} \mathbf{1}(u_{max} - u) \\ -\mathbf{1}(u_{min} + u) \\ \mathbf{1}\Delta u_{max} \\ -\mathbf{1}\Delta u_{max} \\ \mathbf{1}y_{max} - f \\ -\mathbf{1}y_{min} + f \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

III.6 Simulation et résultats

Dans cette section nous présenterons la simulation de la commande prédictive du système non linéaire sous Matlab7.12 Simulink.

La GPC a été appliquée avec un temps d'échantillonnage $T_s = 1$ seconde, $\lambda = 0.8$, un horizon de prédiction $N_p = 20$ min et un horizon de contrôle $N_u = 5$ sec.

Et sous les conditions suivantes : $T_{ca} = 20^\circ\text{C}$, $T_{sa} = 20^\circ\text{C}$, le débit de l'eau entre l'échangeur et le capteur solaire est fixe, $\dot{V}_c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

III.6.1 Simulation avec contrainte négative

En premier lieu, nous effectuerons la simulation avec contrainte négative pour voir la différence avec le contrôleur GPC avec contrainte positive. Pour cela, nous avons choisi une journée bien ensoleillée et sans perturbation le 30/05/2014 au site de l'UDES (Bou-Ismaïl W.Tipaza)(Fig. 3.3). Nous constatons que l'irradiation solaire ne dépasse pas 300 w/m^2 , après 8h 10min du matin, et elle continue à augmenter jusqu'à son maximum 790 w/m^2 à 12h 30min. La température ambiante du même site et pour la même journée est représentée par la figure 3.4. Nous remarquons que la température ambiante varie entre 17°C et 24°C au cours de la journée. A cette fin, nous avons pris 20°C comme valeur moyenne et initiale pour notre simulation. La

température au niveau de la sortie du capteur solaire (Fig. 3.5) est liée directement à l'irradiation solaire.

Nous remarquons que le retard de la réponse du capteur solaire est dû aux caractéristiques thermiques de l'eau comme le montre la figure 3.7 et que la température de la cuve suit parfaitement la température de référence.

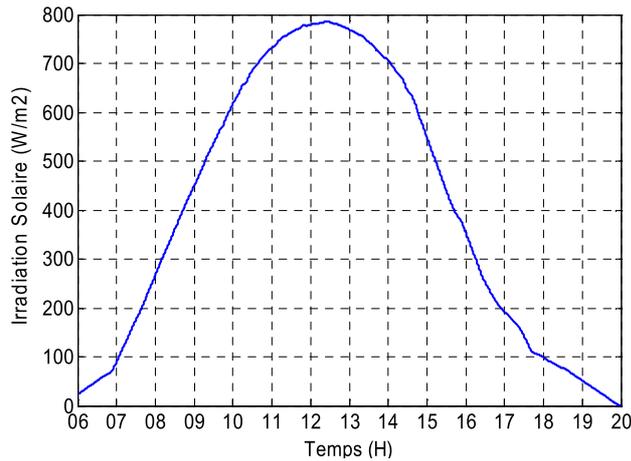


Fig. 3.3 Irradiation solaire du 30/05/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

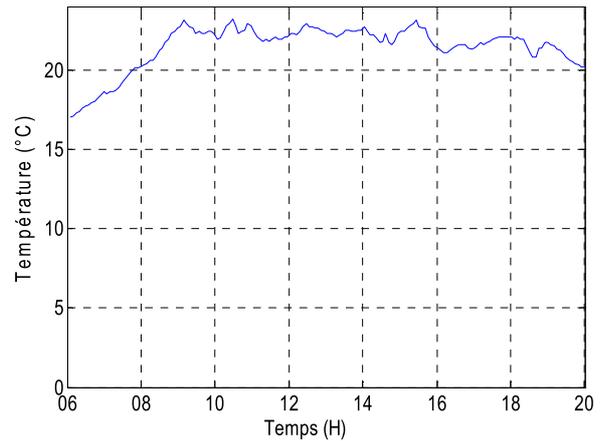


Fig. 3.4 Température ambiante du 30/05/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

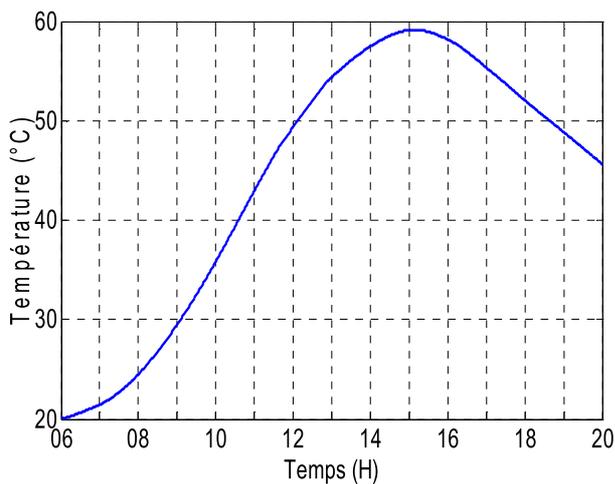


Fig. 3.5 Sortie du capteur solaire.(Tc)

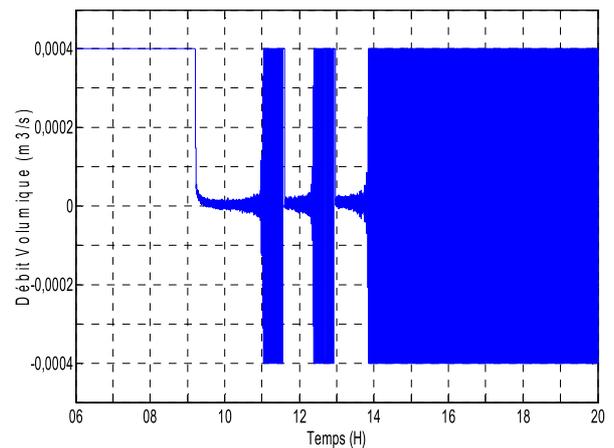


Fig. 3.6 Signal de la commande (u)

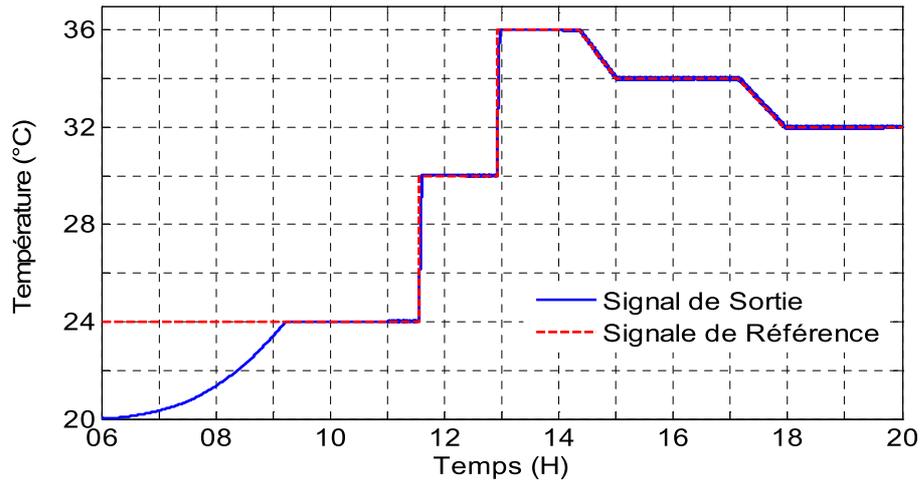


Fig. 3.7 Température de sortie. (T_s) du contrôleur GPC sans contraintes

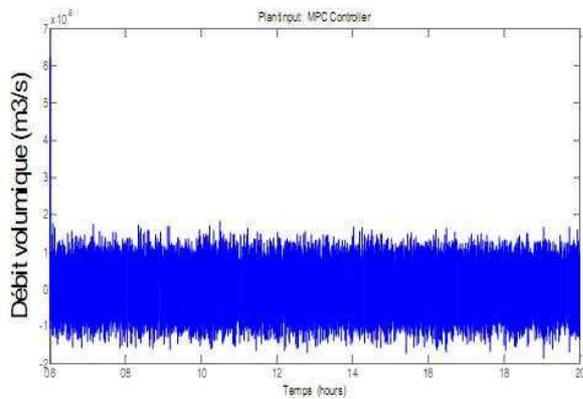


Fig. 3.8 Variation de la commande. (Δu)

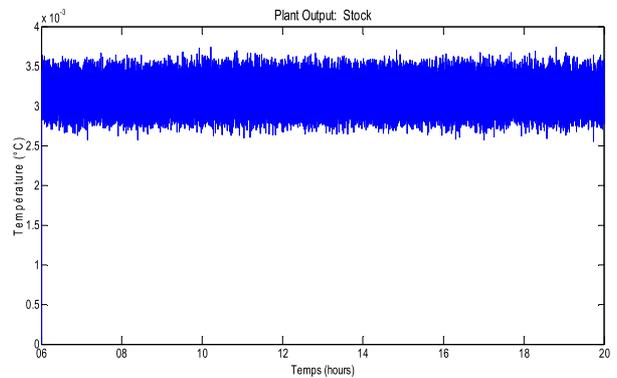


Fig. 3.9 Variation de la sortie. (Δy)

III.6.2 Simulation avec contraintes positives

La simulation est faite avec l'irradiation solaire de la journée du 23/09/2013 présentée dans la figure 2.4 du chapitre précédent. L'effet des contraintes est observé clairement dans La figure 3.10.

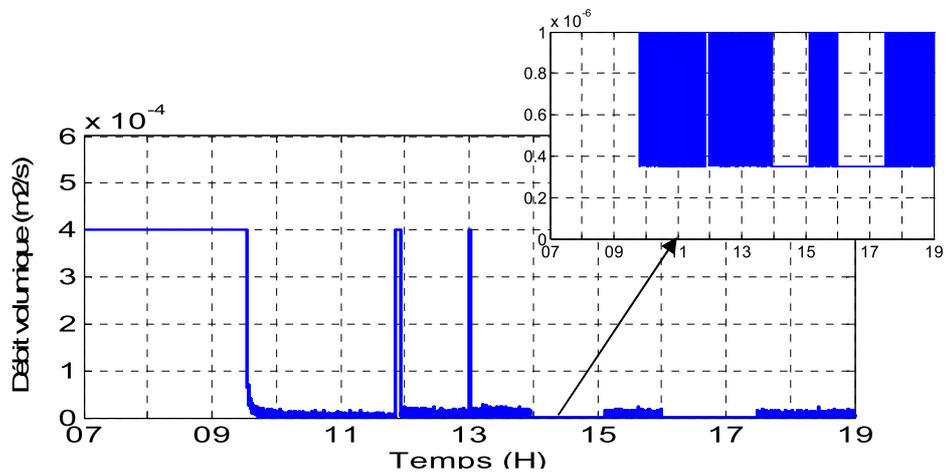


Fig. 3.10 Signal de commande (u) avec contrainte positive

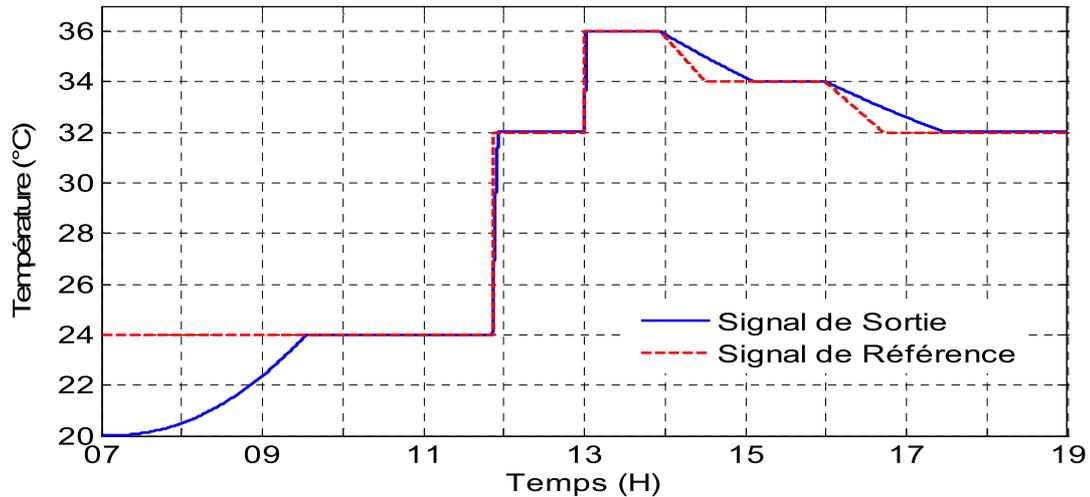


Fig. 3.11 Réponse du signal de sortie. (T_s) du contrôleur GPC avec contraintes

La figure.3.10 montre la commande appliquée sur le débit de la vanne. Le débit de la pompe est limité par une vitesse maximum ($\dot{V}_{s_{max}} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) et une vitesse minimale ($\dot{V}_{s_{min}} = 3.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$); ce qui permet à la commande prédictive de gérer les contraintes (limitations physiques). Ces contraintes ont une légère influence (qu'on ne peut pas voir) sur la réponse du signal de sortie dans le cas où le signal de référence augmente. Mais, elles ont une grande influence sur le signal de réponse lorsque le signal de référence diminue; car, la pompe tourne réellement dans un sens unique et ne peut pas tourner dans le sens négatif.

En plus, la pompe est limitée, aussi, par une limitation inférieure ($\dot{V}_{s_{min}}$) pour ne pas permettre à l'eau de geler en temps de froid. Nous estimons, sous réserve, que ces raisons sont à l'origine du retard de 30min lorsque le signal de référence est diminué de 36°C à 34°C.

III.6.3 Influence de l'horizon de commande (N_c)

La figure 3.12. représente l'influence de l'horizon de commande (N_c) de GPC sur le contrôle du système. Pour les différentes valeurs étudiées ($N_c = [5, 10, 12]$), nous avons constaté que la valeur de $N_c=5$ a donné de bons résultats. En outre, malgré notre essai de varier les valeurs, nous avons remarqué qu'à partir de la valeur ($N_c = 15$) notre système a commencé de diverger et de se déstabiliser.

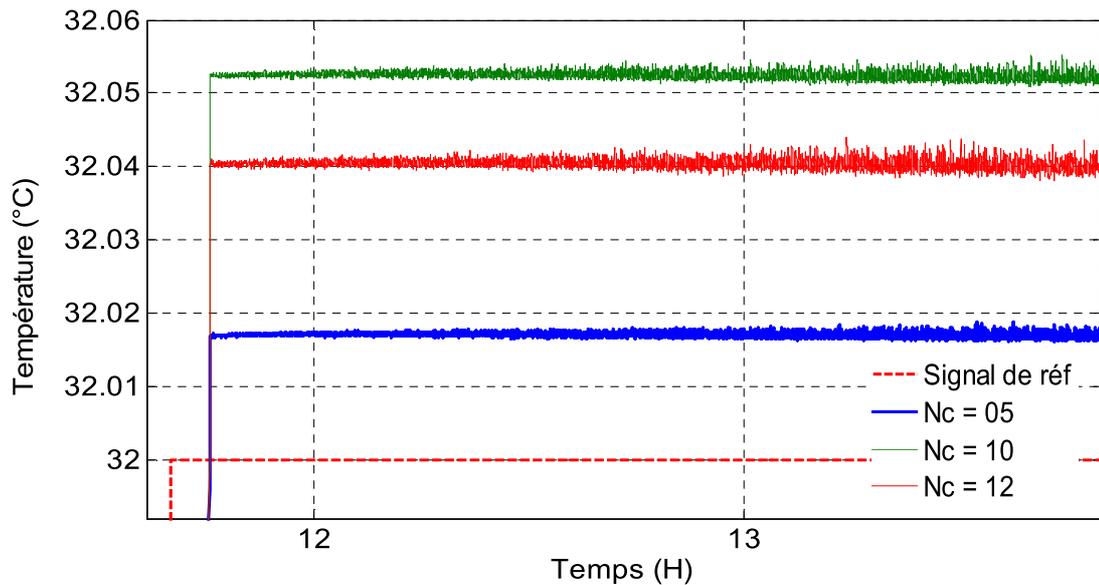


Fig. 3.12 Influence de l'horizon de commande (N_c)

III.6.4 Test de robustesse

6.4.1 Robustesse par rapport à la perturbation

Pour tester la robustesse du contrôleur, nous avons choisi une journée ensoleillée mais marquée par quelques nuages (perturbations). La figure.3.13 représente l'irradiation solaire de la journée du 25/04/2014 au niveau du site de l'UDES (Bou-Ismaïl-Tipaza). Nous constatons que l'irradiation solaire a fortement diminué entre 10h30min et 12h passant de 952 W/m^2 à 169 W/m^2 .

Cette brusque diminution, d'une durée plus de 1h30, a influé directement sur la sortie du capteur solaire comme le montre la figure.3.14.

Malgré les perturbations de l'ensoleillement et l'insuffisance de la température demandée dans la cuve de stockage de l'eau (dans ce cas il faut un système hybride -une seconde source d'énergie- généralement à gaz afin de combler le déficit de l'énergie); le contrôleur attend de 10h45min jusqu'à 11h30 pour que la température de la cuve de stockage atteigne la température demandée ($30 \text{ }^\circ\text{C}$) pour continuer sa régulation. Nous pouvons donc déduire que malgré les perturbations, le contrôleur est resté fiable et robuste vis-à-vis des perturbations (Fig. 3.15).

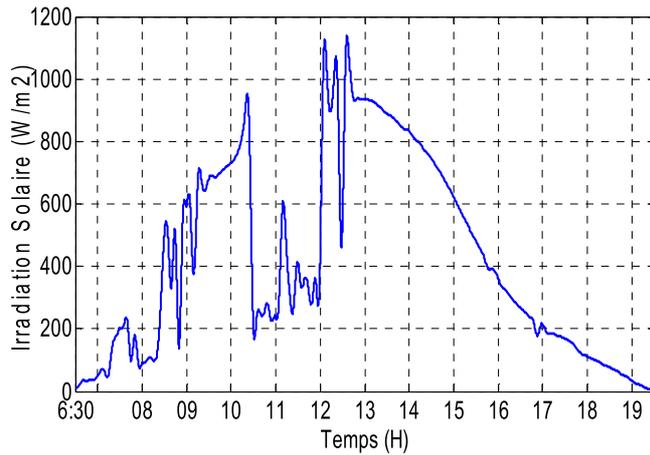


Fig. 3.13 Eclairage solaire du 25/04/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

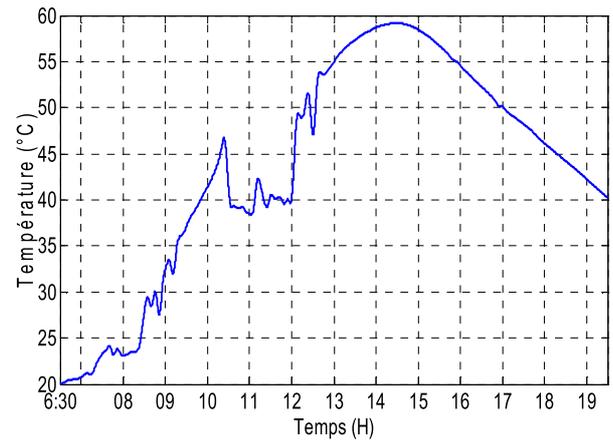


Fig. 3.14 Sortie du capteur solaire. (T_c) du 25/04/2014

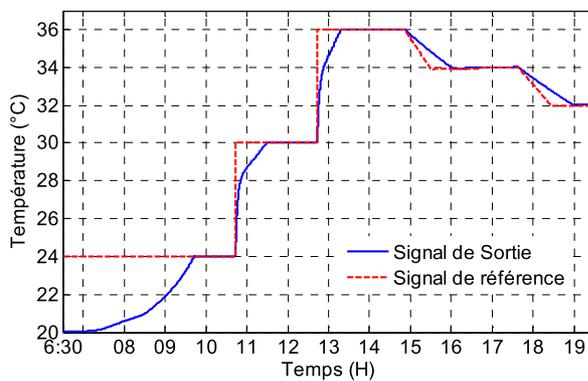


Fig. 3.15 Réponse du signal de sortie. (T_s) du 23/09/2013

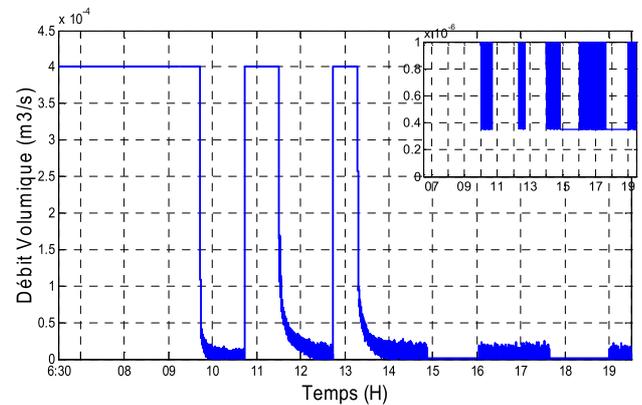


Fig. 3.16 Signal de commande (u)

6.4.2 Robustesse par rapport à la variation paramétrique (U_{ex}) :

L'échangeur est l'élément principal du système thermique ; ce qui permet de transférer le maximum d'énergie extraite du capteur solaire vers la cuve de stockage. Le coefficient d'échange de chaleur (U_{ex}) avec le temps perd sa fiabilité. Pour étudier la robustesse par rapport aux changements de ce paramètre, nous appliquons des variations inférieures à 20% et à 30% de leurs valeurs initiales.

La figure 3.17 montre la réponse des différents coefficients ($U_{ex} = 250$, $U_{ex} = 200$, $U_{ex} = 180$). Nous constatons que malgré le retard de réponse de la sortie (T_s) à cause de l'abaissement du coefficient d'échange de chaleur, notre contrôleur reste robuste aux variations paramétriques.

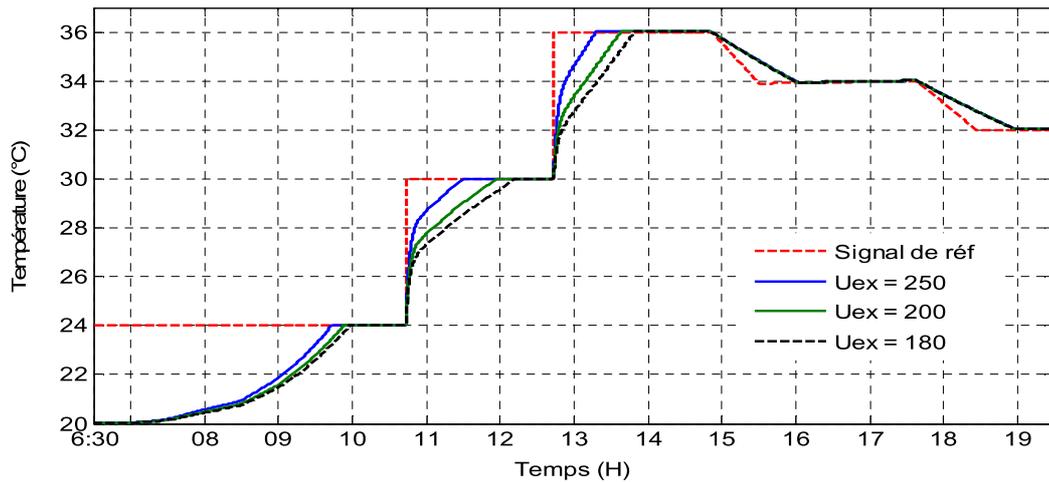


Fig. 3.17 Réponse du signal de sortie (T_s) avec différents coefficients de transfert (U_{ex})

III.6.5 Effet de la variation de la perturbation de charge (la température T_d)

Pour tester l'influence de différentes températures de la charge, nous avons fait varier la température de l'eau entrant dans la cuve de stockage ($T_d = 20, 15, 05$ °C). Nous constatons que pendant l'augmentation du signal de référence, un retard important est marqué sur le signal de réponse (T_s). Lorsque le signal de référence diminue, le signal de sortie le suit proportionnellement suivant la baisse de température. (Fig. 3.18)

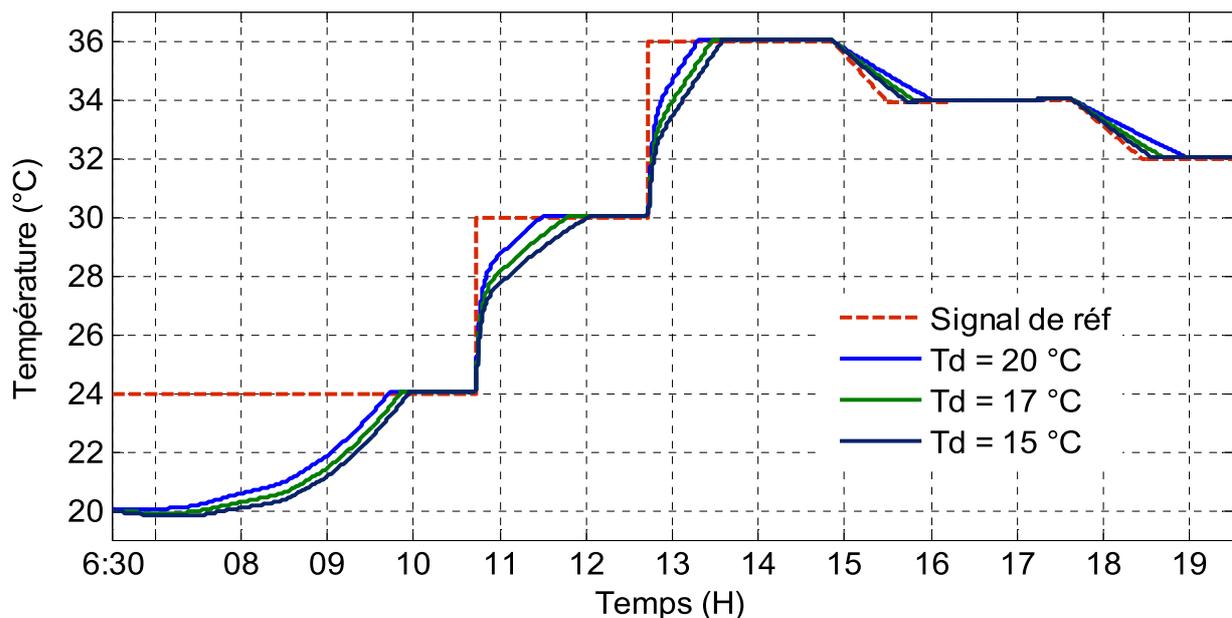


Fig. 3.18 Réponse du signal de sortie (T_s) avec différents températures de la charge (T_d)

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons construit un modèle mathématique, afin d'établir un contrôleur prédictif et nous avons évalué les performances et la robustesse de la commande prédictive avec l'effet de fortes variations du rayonnement solaire global sur la robustesse du modèle. Nous pouvons conclure que les grands avantages de la commande prédictive sont la capacité de gérer les différentes contraintes que ce soit à l'entrée du système, sur les variables des états, ou sur les variables des sorties ; également la commande prédictive convient parfaitement pour les systèmes dont leurs comportements dynamiques ont des temps de retard considérables.

Par contre, les inconvénients de MPC sont l'effort de concevoir le modèle dynamique, l'effort de calcul pour résoudre le problème d'optimisation et enfin les incertitudes dans les prévisions, les connaissances limitées et les simplifications dans la dynamique du système.

Pour cela, et pour éviter la construction du modèle mathématique, il serait préférable de proposer une autre commande robuste qui n'a pas besoin d'un modèle, il s'agit de la commande par mode glissement qui est une commande robuste, cette dernière sera étudiée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

*Commande par mode de glissement
du chauffe-eau solaire*

IV.1 Introduction

Dans les systèmes dynamiques réels, en général, et les systèmes solaires, en particulier, il est impossible d'éviter les incertitudes liées à la modélisation imparfaite en raison des facteurs de l'environnement tels que l'irradiation solaire (variation rapide), la température, la pression et les autres perturbations externes. Dans ce cas, les lois de commande classiques deviennent insuffisantes et le contrôle de tels systèmes nécessite une commande insensible aux perturbations externes, aux variations des paramètres et aux non linéarités.

Cependant, pour faire face à ce problème, la commande par mode de glissement est une solution plus générale; car elle peut traiter les systèmes linéaires incertains et non linéaires d'une manière simple et efficace [80].

La commande par mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable VSS (Variable Structure System).

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques-unes des notions de base de la théorie de la commande en mode glissant qui sont données en premier lieu et nous aborderons, ensuite, la conception de la commande par mode de glissement. Nous étudierons, aussi, l'application de cette commande sur le chauffe-eau solaire et, enfin, nous discuterons les résultats de simulation.

IV.2 Bref historique de la commande par mode glissement

La commande par mode de glissement qui n'est autre qu'un cas particulier de la théorie des systèmes à structure variable et multifonctions, est basée, essentiellement, sur la résolution des équations différentielles à second membre discontinu [75].

L'origine de la recherche, dans ce domaine, concernant les systèmes de commande à structure variable en mode de glissement a été initiée et développée par plusieurs chercheurs de l'ancienne (URSS) notamment au début des années 50 par Emelyanov [59], [60] et d'autres chercheurs [4], [37]. Dans leurs travaux pionniers, le modèle considéré était un système de second ordre linéaire modélisé en phase de forme variable. Ensuite, ces recherches ont connu un nouvel essor, à la fin des années soixante-dix, lorsque Utkin [76] a introduit la théorie des modes glissants à partir des résultats des études du mathématicien Filipov [1].

Après les travaux développés par l'équipe du professeur Emelyanov, en union Soviétique, et à cause des problèmes de broutements et de réalisation, la recherche dans le domaine de la commande à structure variable a attendu la fin des années soixante dix pour connaître sa réapparition et sa relance avec l'avancée de l'électronique et l'informatique. En effet, cette

commande est basée sur une commutation à haute fréquence pour un meilleur régime glissant. Aux Etats-Unis, cette théorie est introduite par Slotine [29] et au Japon, par D.K.Young [86]. Il a fallu attendre les années 80 pour que le concept de cette théorie trouve ses applications dans plusieurs domaines. Elle est considérée comme l'une des approches les plus utilisées dans la commande des systèmes non linéaires et des systèmes ayant des modèles imprécis. Elle est devenue aussi parmi les techniques de contrôle non linéaire les plus efficaces et les plus robustes [2], [35], [85].

IV.3 Structures de base

Dans la théorie de la structure variable utilisant la commande par mode de glissement, nous citons trois configurations de base très répandues [9], [79].

La première configuration correspond à un changement de structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable, la seconde change de structure au niveau de l'organe de commande et, enfin, la troisième configuration change aussi sa structure au niveau de l'organe de commande mais avec rajout d'une commande dite « commande équivalente ».

IV.3.1 Structure par commutation d'une contre-réaction d'état

Le schéma de la structure par commutation d'une réaction d'état est représenté dans la figure 4.1

$$\begin{cases} u = -K_1^T(x) & \text{si } s(x) > 0 \\ u = -K_2^T(x) & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

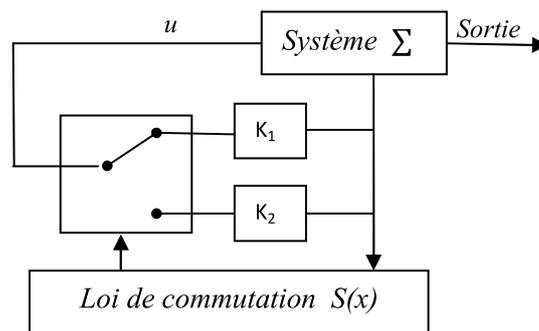


Fig. 4.1 Changement de structure par commutation d'une contre-réaction d'état

Le choix de la contre-réaction d'état par $-K_1$ ou $-K_2$ se fait à l'aide de la loi de commutation $s(x)$ et également en fonction du vecteur d'état x .

Le comportement dynamique du système Σ est déterminé par : $s(x) = 0$

IV.3.2 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure de commande est la plus classique et la plus ordinaire (Fig 4.2). Elle correspond au fonctionnement «tout ou rien» des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse [7].

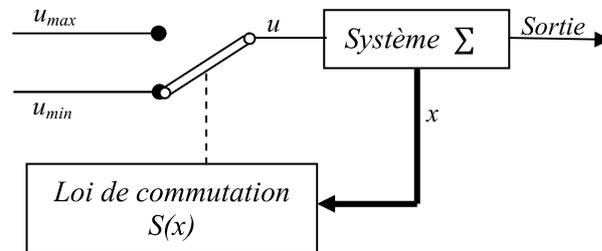


Fig. 4.2 Changement de structure par commutation au niveau de l'organe de commande

La loi de commutation est donnée par :

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{si } s(x) > 0 \\ u_{min} & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

IV.3.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec rajout de la commande équivalente.

Le schéma d'une telle structure est représenté par la figure 4.3. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de la commande est beaucoup moins sollicité, mais la commande est plus dépendante des variations paramétriques du fait de la présence de la commande équivalente (u_{eq}).

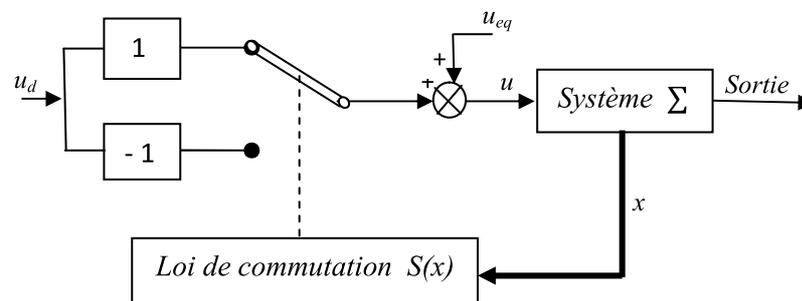


Fig. 4.3 Changement de structure avec rajout de la commande équivalente.

Le terme de commutation u_d assure, principalement, la convergence des trajectoires du système vers l'état désiré et assure son maintien. La loi de commutation est donnée par:

$$u = \begin{cases} u_{eq} + u_d & \text{si } s(x) > 0 \\ u_{eq} - u_d & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude.

IV.4 Principe de la commande par mode de glissement

Le principe de la commande par modes glissants est de forcer le système à converger vers une surface choisie ensuite, à l'aide de la loi de commutation qui obligera le système de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée **surface de glissement** et le mouvement le long de laquelle elle se produit est appelé mouvement de glissement. Ce mouvement continue à évoluer malgré les incertitudes et les perturbations.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes (Fig 4.4):

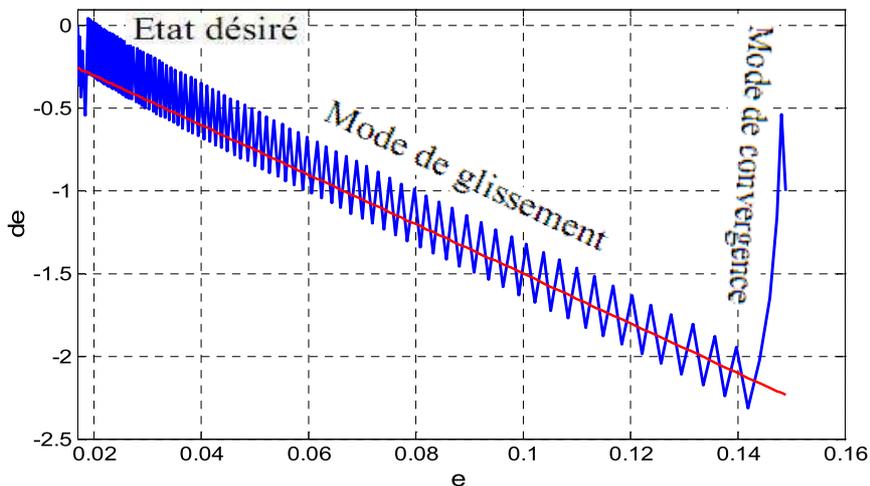


Fig 4.4 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

- **Le mode de convergence (MC)**: c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- **Le mode de glissement (MG)**: c'est le mode durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y) = 0$.
- **Le mode du régime permanent (MRP)**: Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

IV.5 Concepts de base

La synthèse d'une loi de commande par mode glissant peut être développée en trois étapes principales :

- **la surface de glissement** qui permet la convergence de la trajectoire d'état du système vers le point d'équilibre désiré.
- **la condition d'existence** du mode de glissement qui est reliée à la convergence de la trajectoire d'état vers le point d'équilibre.
- **La détermination de la loi de commande** qui a pour rôle de maintenir les conditions de glissement (attractivité).

IV.5.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement est totalement libre. Plusieurs formes de la surface de glissement ont été proposées dans la littérature, chacune présente des meilleures performances pour une application donnée.

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase [68]. Elle est construite de telle sorte que le système ait toujours une dynamique désirée.

Soit le système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t).u \quad (4.4)$$

Parmi les surfaces linéaires, nous citons la surface proposée par Slotine [33]:

$$S_j(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_j \right)^{r-1} . e_j \quad \text{et } j = (1, m) \quad (4.5)$$

avec :

$e(t)$: L'écart entre la variable à régler et sa référence.

λ : Une constante positive.

r : Le degré relatif qui représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

L'expression de la surface est une équation différentielle dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

Elle est généralement choisie avec un degré relatif égal à un (pour notre cas).

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro qui est exprimée par une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$ pour un choix convenable du paramètre. Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire équivalant à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

IV.5.2 Condition de convergence et d'existence

Les conditions d'existence du mode de glissement sont des critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment des perturbations.

Il existe deux approches pour assurer le mode de convergence :

- **L'approche directe** est la plus ancienne qui a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est globale mais ne garantit pas un temps d'accès fini. Elle est exprimée par :

$$\sigma(x) \cdot \dot{\sigma}(x) < 0 \quad (4.6)$$

- **L'approche de Lyapunov** est une condition globale d'accès au mode glissant où il s'agit de choisir une fonction scalaire positive appelée fonction de Lyapunov qui exprimée par:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sigma^2(x) \quad (4.7)$$

Cette fonction est définie positive de manière évidente. La condition nécessaire et suffisante pour que la variable de glissement $\sigma(x,t)$ tende vers zéro est que la dérivée de V soit définie négative:

$$\dot{V}(x) = \sigma(x) \cdot \dot{\sigma}(x) < 0 \quad (4.8)$$

Cette inégalité est appelée *condition d'attractivité* qui n'est pas suffisante pour assurer une convergence en temps fini vers la surface de glissement. Pour assurer une convergence de $\sigma(x,t)$ vers 0 en temps fini, une condition plus forte doit être respectée. Dans le cas des modes glissants classiques, on utilise généralement la condition d'attractivité non-linéaire dite condition *de η -attractivité* [95].

$$\sigma \cdot \dot{\sigma} \leq -\eta \cdot |\sigma|, \quad \eta > 0 \quad (4.9)$$

Cela revient, pour $\sigma \neq 0$ à

$$\dot{\sigma} \leq -\eta \cdot \text{sign}(\sigma), \quad \eta > 0 \quad (4.10)$$

On voit tout de suite pourquoi ce critère garantit une convergence en temps fini. Par intégration, si $\sigma(0) > 0$, $\sigma(t) \leq \sigma(0) - \eta \cdot t$, et si $\sigma(0) < 0$, $\sigma(t) \leq \sigma(0) + \eta \cdot t$; donc $\sigma(t)$ atteint 0 en un temps inférieur à $\frac{|\sigma(0)|}{\eta}$. Dans tous les cas, ce critère est tout le temps assuré si la commande est de type :

$$u = -u_M \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (4.11)$$

avec l'amplitude u_M choisie de manière à être suffisamment grande.

IV.5.3 Calcul de la commande

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, l'une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre stabilisante (u_n).

$$u = u_{eq} + u_n \quad (4.12)$$

u_n est la commande discontinue pour ramener le système dynamique à partir du point initial jusqu'à ce qu'il atteigne le mode de glissement et à chaque fois qu'il s'en écarte.

u_{eq} est la commande équivalente définie comme étant la commande qui rend la surface de commutations invariante dans le temps ($\dot{\sigma} = 0$) [55].

La commande équivalente est définie comme une commande continue qui est appliquée à l'entrée du système pour maintenir le système en mode de glissement.

Le comportement dynamique du système en régime de glissement idéal, l'expression des surfaces et de leurs dérivées sont nulles. Ceci se traduit par:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} [f(x, t) + g(x, t) \cdot u] = 0 \quad (4.13)$$

avec : $u = u_{eq}$ car $u_n = 0$.

D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = -\left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} g(x, t)\right]^{-1} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} f(x, t) \quad (4.14)$$

Il s'avère que :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} g(x, t) \neq 0 \quad (4.15)$$

L'équation (4.15) constitue une autre condition d'existence du régime glissant. Elle est appelée : **condition de transversalité**.

Mais, le régime idéal n'est, pratiquement, jamais réalisable. On doit ainsi faire usage du deuxième terme de la commande pour ramener l'état du système vers la surface à chaque fois qu'il s'en écarte (Fig. 4.5).

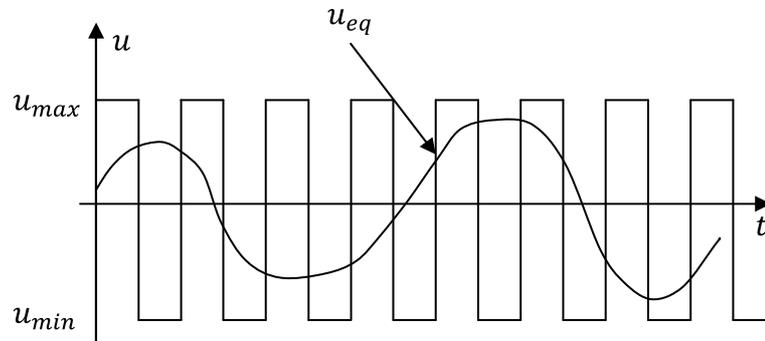


Fig 4.5 Commande équivalente (u_{eq})

Afin de satisfaire la condition de η -attractivité (4.10), il suffit de choisir la partie discontinue de la commande comme suit :

$$u_n = -K \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (4.16)$$

avec K comme gain de commande choisi suffisamment grand pour compenser l'écart dynamique entre le système réel et de référence et les perturbations du système.

La valeur de K doit être suffisamment grande pour faire en sorte que le mode de glissement soit un modèle idéal ($\dot{\sigma} \cdot \sigma < 0$).

IV.6 Broutement (Chattering)

Malgré les avantages de la commande en mode glissant, la simplicité et la robustesse du contrôleur, l'application de cette commande provoque un phénomène indésirable d'oscillations appelé broutement (chattering en Anglais), qui est une oscillation de très haute fréquence de la variable de glissement autour de la rampe de glissement. Ce phénomène nuisible conduit souvent à des résultats indésirables, par exemple, une faible précision de commande, une forte usure des pièces mécaniques en mouvement.

Dans la littérature, des solutions multiples, pour réduire ces oscillations ont été proposées [25], [43], [74]. Notamment, deux méthodes les plus populaires que nous présentons. L'une consiste à introduire une couche limite autour de la surface de commutation et au moyen d'un contrôle continu à l'intérieur de la couche limite (boundary layer) [49]. Cette première méthode consiste à remplacer l'effet discontinu de $\text{sign}(\cdot)$ par une approximation continue à gain élevé, dans un proche voisinage de S , et saturée en dehors de ce voisinage (Fig.4.6).

L'autre technique, pour réduire le broutement, consiste à déplacer le problème de la discontinuité due à l'élément de commutation de la loi en régime glissant sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement au lieu d'agir sur la première dérivée comme dans le cas du régime glissant d'ordre un [24], [44].

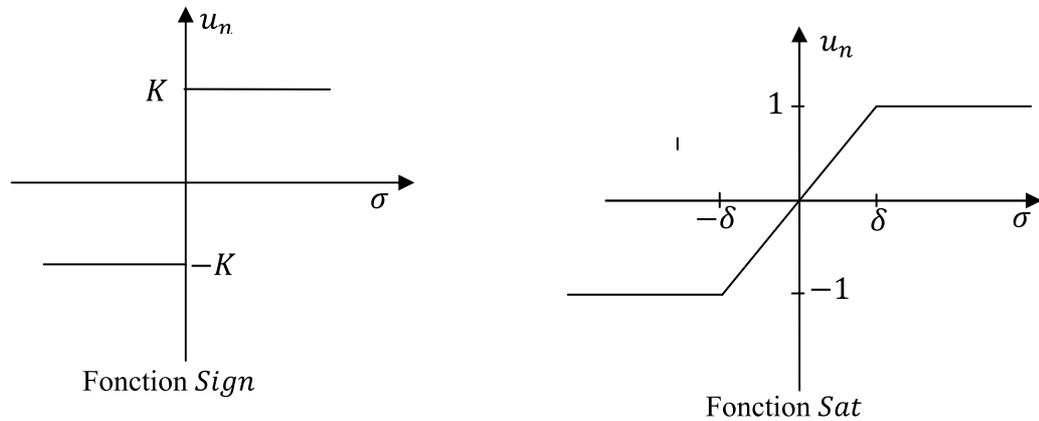


Fig. 4.6 Fonction *Sign* et *Sat*

IV.7 Application de la commande par mode de glissement au chauffe-eau solaire

- **Détermination de la commande**

Dans cette partie, nous nous intéresserons à l'application de la commande par mode de glissement sur le chauffe-eau solaire. Cela, à partir de la modélisation faite au chapitre II.

L'équation dynamique du chauffe-eau solaire trouvée dans le chapitre II nous permet de réécrire l'équation sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \dot{x}_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, u) \\ \dot{x}_4 = C41(T_d - x_4) + C42.u.(x_3 - x_4) + C43.(T_{amb} - x_4) \end{cases} \quad (4.17)$$

avec : $C41 = \frac{\dot{V}_l}{V_s}$, $C42 = \frac{1}{V_s}$, $C43 = \frac{A_s.K_s}{\rho_s C_s V_s}$ et u : est La commande.

Pour le sous système (4.17), le degré relatif est $r = 1$. Pour cela nous avons choisi la surface de glissement comme suit :

$$Y_{Sortie} = h.x_4 \quad \text{avec } h = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \rightarrow y = x_4$$

L'erreur : $e = y_d - y = x_{4d} - x_4$

avec y_d comme sortie désirée (dans notre cas c'est la température désirée).

$$\dot{S} = (\dot{x}_{4d} - \dot{x}_4) \quad \text{et d'après (4.16)} \quad \dot{S} = -K \cdot \text{sign}(S)$$

$$\dot{S} = \dot{e}$$

$$-K \cdot \text{sign}(S) = (\dot{x}_{4d} - \dot{x}_4)$$

En remplaçant \dot{x}_4 par sa valeur dans l'équation précédente (4.17):

$$-K \cdot \text{sign}(S) = C41 \cdot (T_d - x_4) + C42 \cdot u_{eq} (x_3 - x_4) + C43 \cdot (T_{amb} - x_4) - \dot{x}_{4d}$$

$$u_{eq} = \frac{1}{C42 \cdot (x_3 - x_4)} \cdot [-K \cdot \text{sign}(S) - C41 \cdot (T_d - x_4) - C43 \cdot (T_{amb} - x_4) + \dot{x}_{4d}]$$

$$u_n = -K \cdot \text{sign}(S)$$

Donc la commande finale est :

$$u = u_{eq} + u_n$$

$$u = \frac{1}{C42 \cdot (x_3 - x_4)} [-K \cdot \text{sign}(S) - C41 \cdot (T_d - x_4) - C43 \cdot (T_{amb} - x_4) + \dot{x}_{4d}] - K \cdot \text{sign}(S) \quad (4.25)$$

L'équation (4.25) représente la commande de la commande par mode de glissement en fonction des variables des états, et le schéma block de la commande est représenté par la figure (4.7).

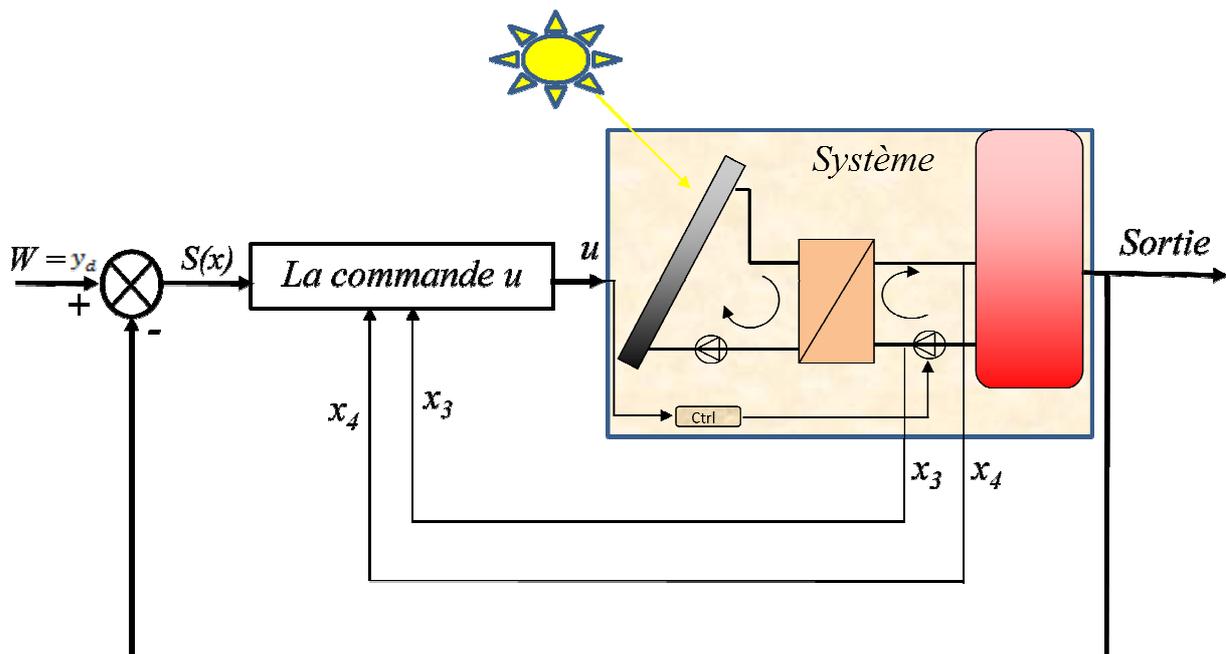


Fig. 4.7 Schéma bloc de la commande par mode de glissement

IV.8 Simulation et résultats

Afin de montrer les performances de la commande par mode glissant, nous avons appliqué les mêmes graphes de l'éclairement solaire et de la température ambiante que ceux utilisés dans les chapitres II et III.

La simulation est réalisée en utilisant le logiciel MATLAB 7.12 SIMULINK avec les paramètres suivantes : $K = 0.003$, $T_{ca} = T_{sa} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_d = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

IV.8.1 Simulation sans contraintes

Pour évaluer les performances du contrôleur en mode de glissement, nous avons simulé le système non linéaire avec l'éclairement solaire et la température ambiante de la journée du 23/09/2013 représentée dans les figures 2.5 et 2.6 du chapitre (II).

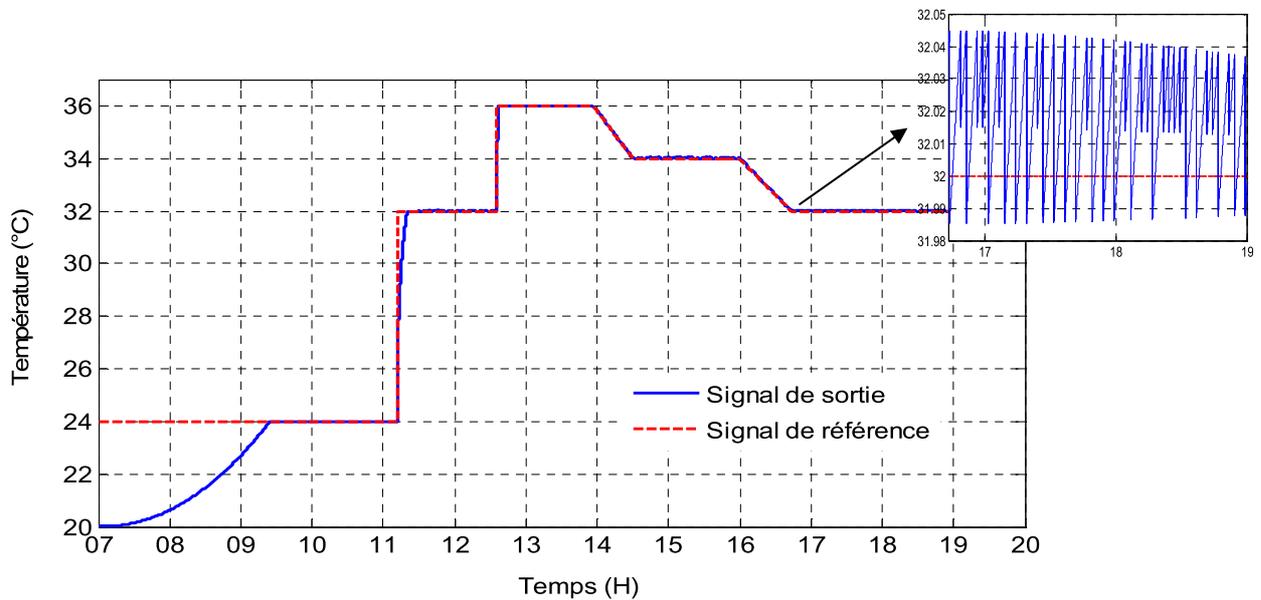


Fig. 4.8 Réponse du signal de sortie. (T_s) du contrôleur MG sans contraintes

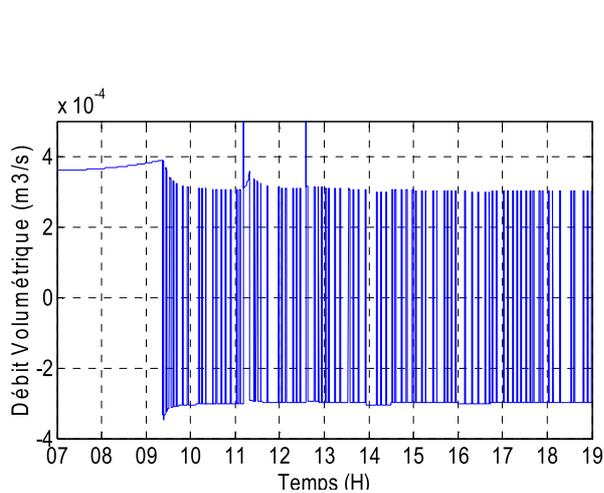


Fig. 4.9 Signal du commande (u) Par MG

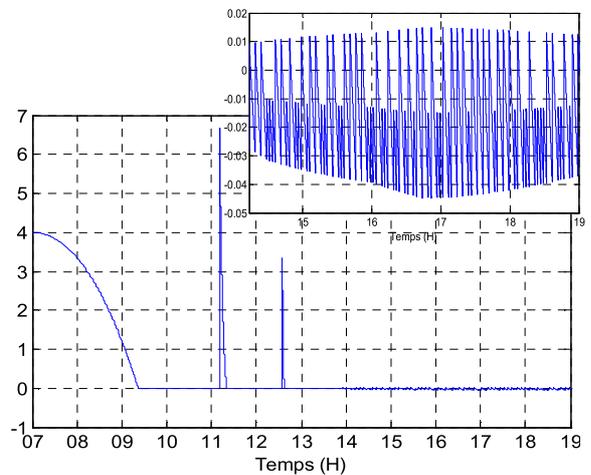


Fig. 4.10 Surface de glissement ($s(e)$)

Nous remarquons que notre contrôleur suit parfaitement le signal de référence (Fig.4.8), malgré une légère oscillation (broutement) à cause de la conception du contrôleur par mode de glissement et la présence de très hautes fréquences de la variable de glissement autour de la rampe de glissement. Ces oscillations n'ont aucune influence dans notre cas.

Les figures. 4.9 et 4.10 montrent respectivement le signal de la commande (u) et la surface de glissement (S). Le signal de la commande varie entre -3×10^{-4} et 3×10^{-4} (m^3/s) tandis que la vanne tourne dans un seul sens (sens unique). Pour cela, nous avons mis des restrictions sur le signal de commande pour qu'il soit toujours positif.

IV.8.2 Simulation avec contraintes

Pour que la commande par mode de glissement soit toujours positive, à cause du sens unique de la vanne, nous avons mis des contraintes sur le signal de commande. La figure 4.11 montre la réponse du signal de sortie par mode de glissement avec contraintes positives. Nous remarquons clairement le retard de plus de 30 minutes sur le signal de sortie par rapport au signal de référence lorsque ce dernier diminue.

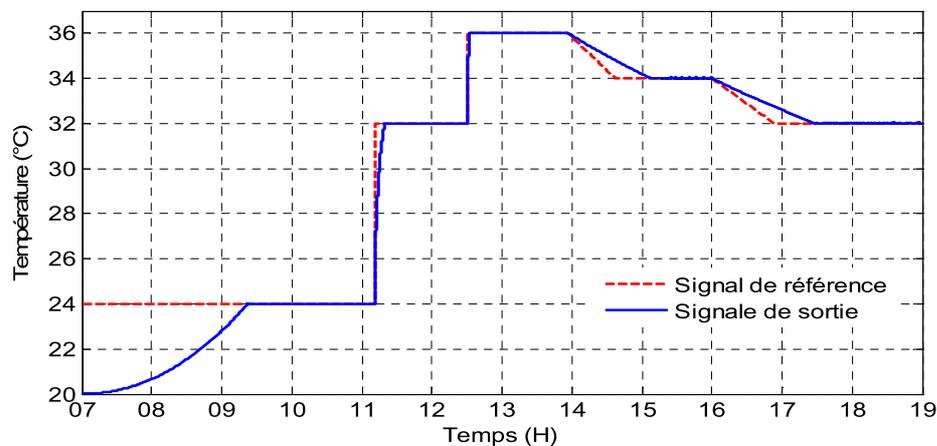


Fig. 4.11 Réponse du signal de sortie. (T_s) du contrôleur MG avec contraintes

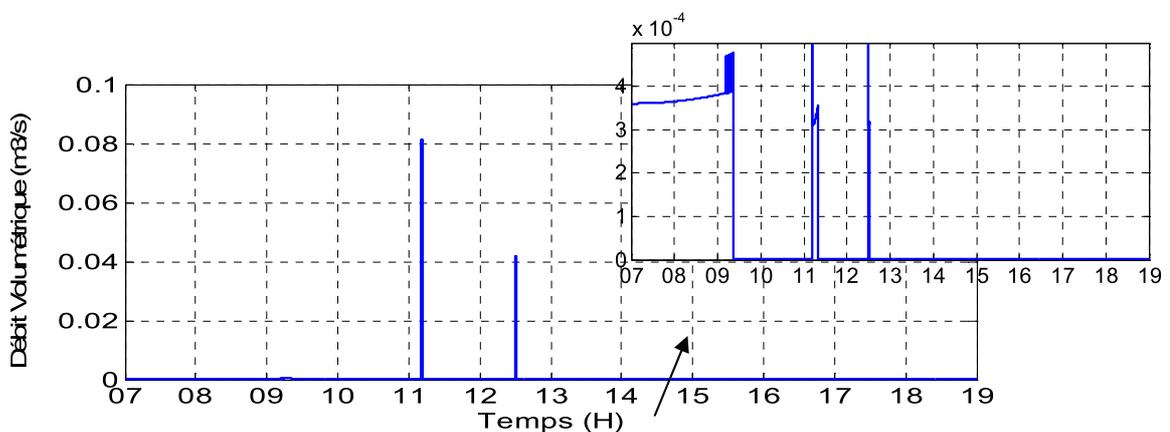


Fig. 4.12 Signal de commande (u) Par MG avec contraintes

IV.8.3 Etude de la robustesse

Afin de tester la robustesse de la commande proposée, nous avons étudié la robustesse de la commande par mode de glissement par rapport aux perturbations et par rapport aux paramètres du système.

IV.8.3.1 Robustesse par rapport aux perturbations

En testant la robustesse de la commande par mode de glissement du chauffe-eau solaire, les mêmes tests utilisés pour la commande prédictive sont effectués. Rappelons que nous avons choisi une journée perturbée comme la journée du 25/06/2014 au niveau du site de Bou-Ismaïl W.Tipaza.

L'évolution de l'irradiation solaire est présentée par la figure 4.13, où la journée était vraiment perturbée. Cette perturbation a influé directement sur la sortie du capteur solaire (Fig. 4.15). La température ambiante de cette même journée (Fig. 4.14) varia entre 21°C et 24.5 °C et la valeur moyenne (22.5 °C) est prise comme une valeur initiale pour notre simulation.

Face à ces perturbations, le contrôleur par mode de glissement est resté robuste (Fig. 4.16.a).

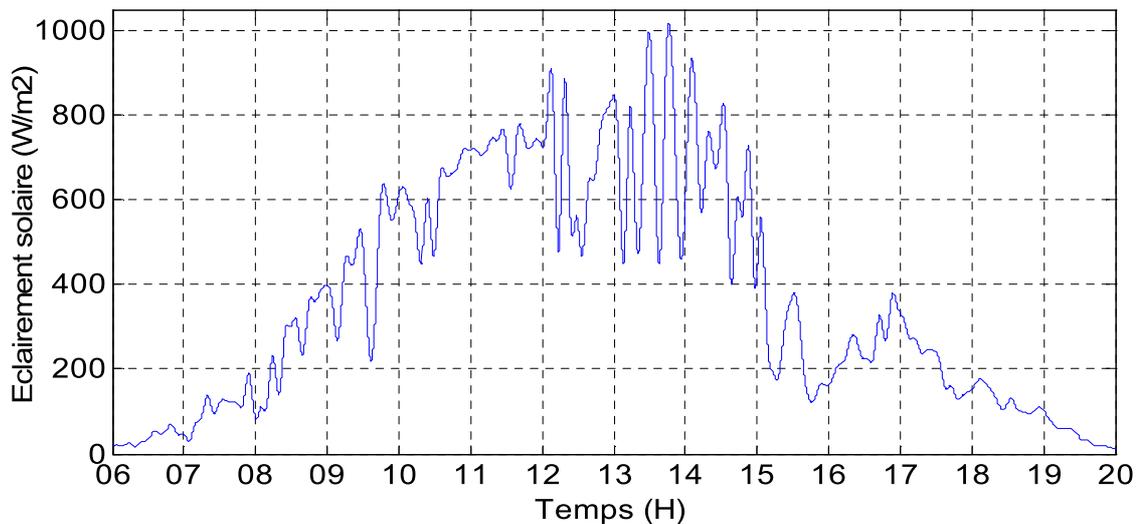


Fig. 4.13 L'irradiation solaire du 25/06/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

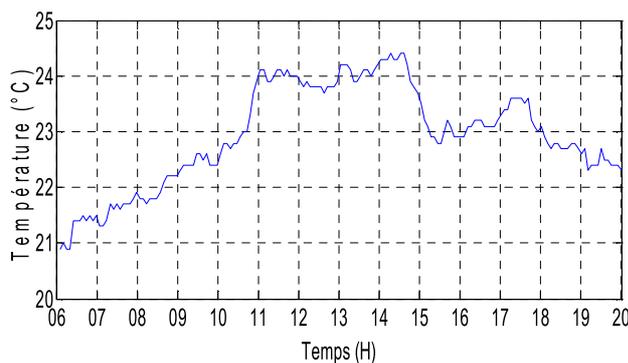


Fig. 4.14 Température ambiante du 25/06/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

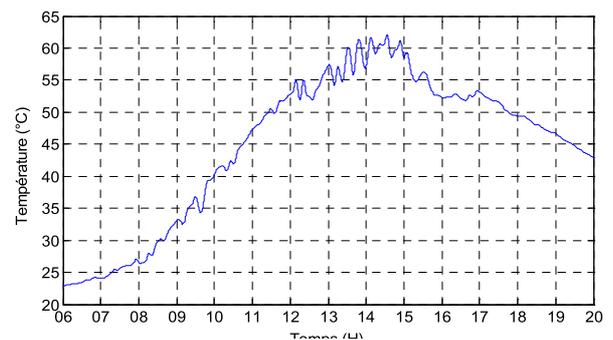
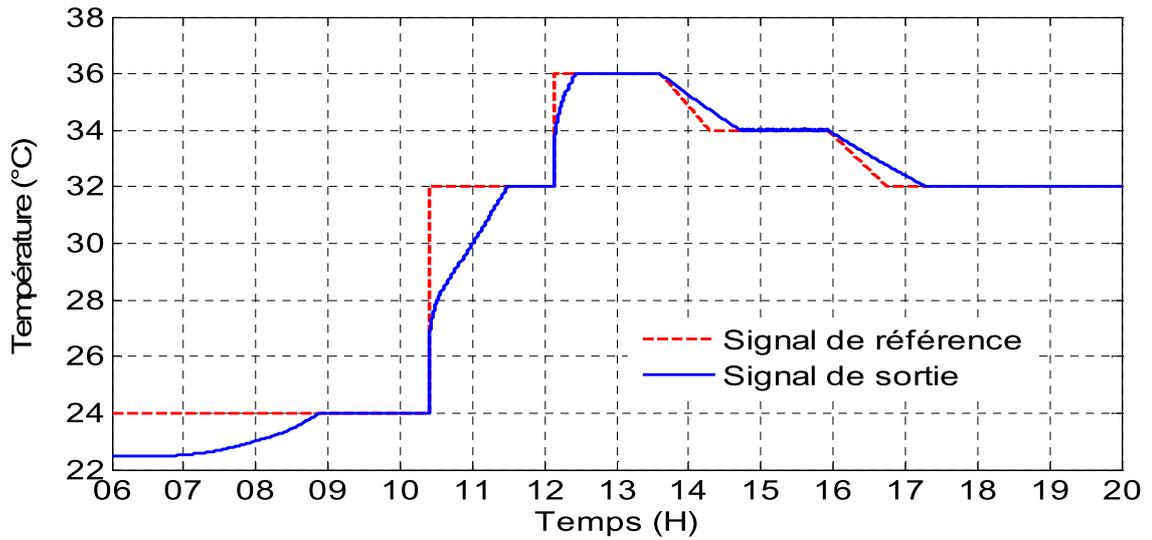
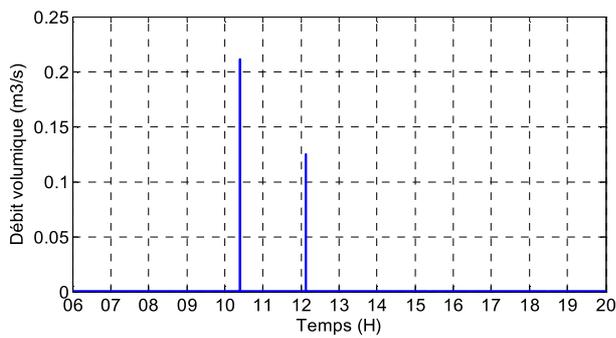


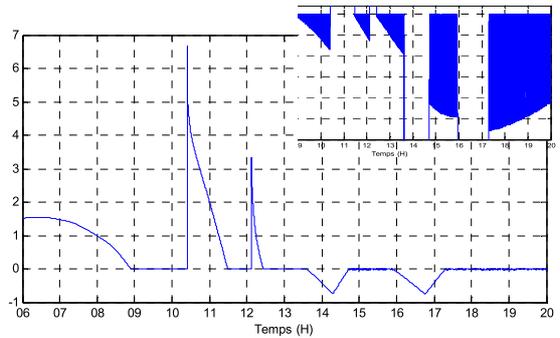
Fig. 4.15 Sortie du capteur solaire.(Tc) du 25/04/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).



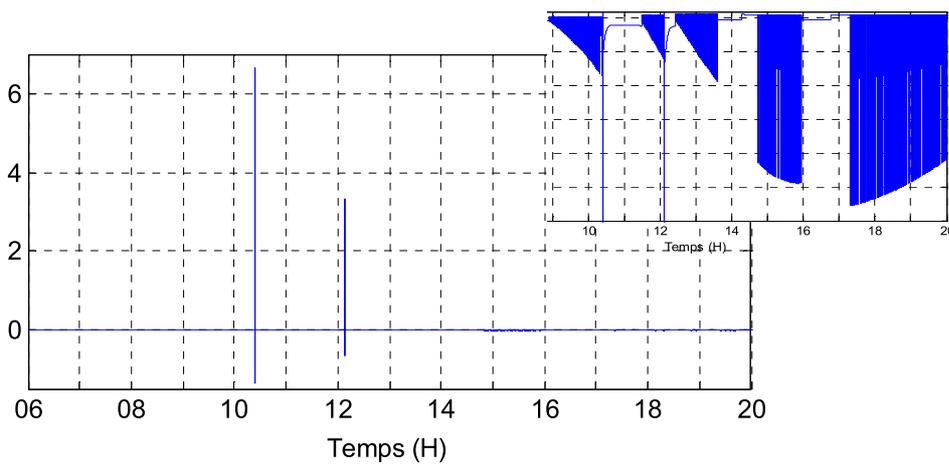
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig 4.16. Test de robustesse par rapport aux perturbations

- a. Signal de sortie (T_s),
- b. Signal de la commande (u)
- c. Surface de glissement (Se),
- d. Variation de l'erreur (Δe)

IV.8.3.2 Robustesse par rapport aux variations paramétriques (U_{ex})

Pour montrer les performances du contrôleur en mode de glissement, nous avons simulé le système avec le changement de ses paramètres et on a choisi le paramètre le plus délicat qui est le coefficient d'échange de chaleur (U_{ex}) partant de sa valeur initiale ($U_{ex} = 250$) vers deux valeurs moindres ($U_{ex} = 200$ et $U_{ex} = 180$).

La simulation de l'irradiation solaire et de la température ambiante ont été simulées durant la journée du 25/06/2014 à l'UDES. La valeur moyenne de la température ambiante est de 22.5 °C, elle a été prise comme valeur initiale dans notre simulation (Fig. 4.17).

Le coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur thermique U_{ex} influe directement sur le signal de sortie pendant l'augmentation de la température de référence et n'a aucune influence lorsque cette température diminue. Malgré la diminution du coefficient de chaleur de 28% de sa valeur initiale ($U_{ex}=250$), le régulateur par mode de glissement reste robuste et fiable.

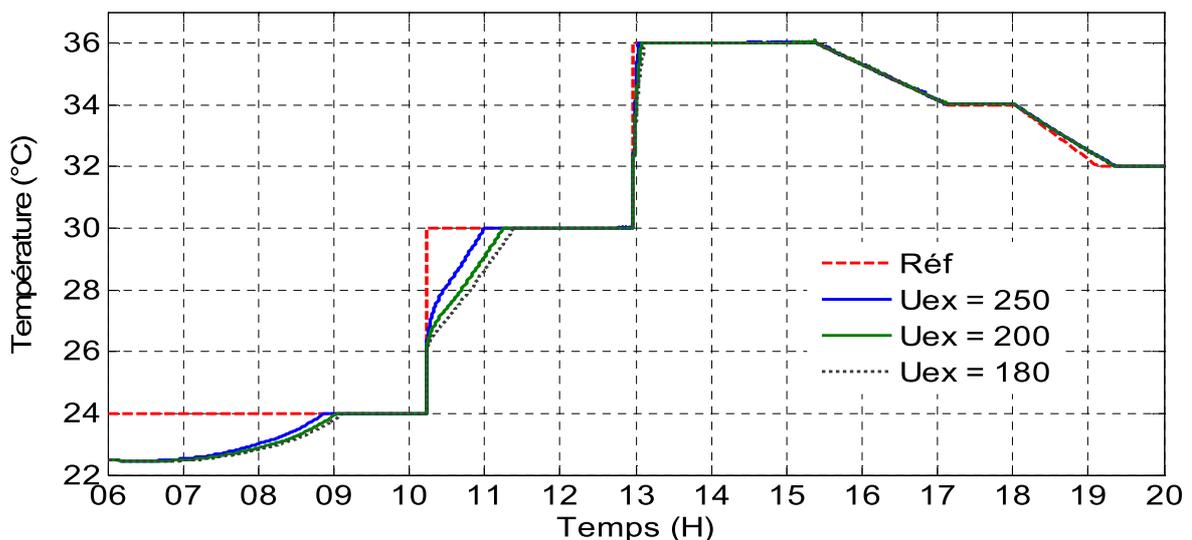


Fig. 4.17 Teste de robustesse par rapport au variation paramétrique (U_{ex})

IV.8.4 Effet de variation de la charge (la température de T_d)

Pour tester l'influence des différentes températures de la charge, nous avons gardé les mêmes données de simulations de la journée du 25/06/2014 et nous avons fait varier la température de l'eau entrant dans la cuve de stockage ($T_d = 20, 17, 15$ °C). Nous constatons que lorsque la température de charge (T_d) diminue, la température de l'eau dans la cuve de stockage diminue et elle accuse un retard de 25 min de chaque -5 °C de T_d pour atteindre 24°C de signal de référence (Fig. 4.18).

Nous constatons aussi que le contrôleur par mode de glissement suit bien le signal de référence pendant la diminution de la température malgré les contraintes positives sur la commande (vitesse de la pompe).

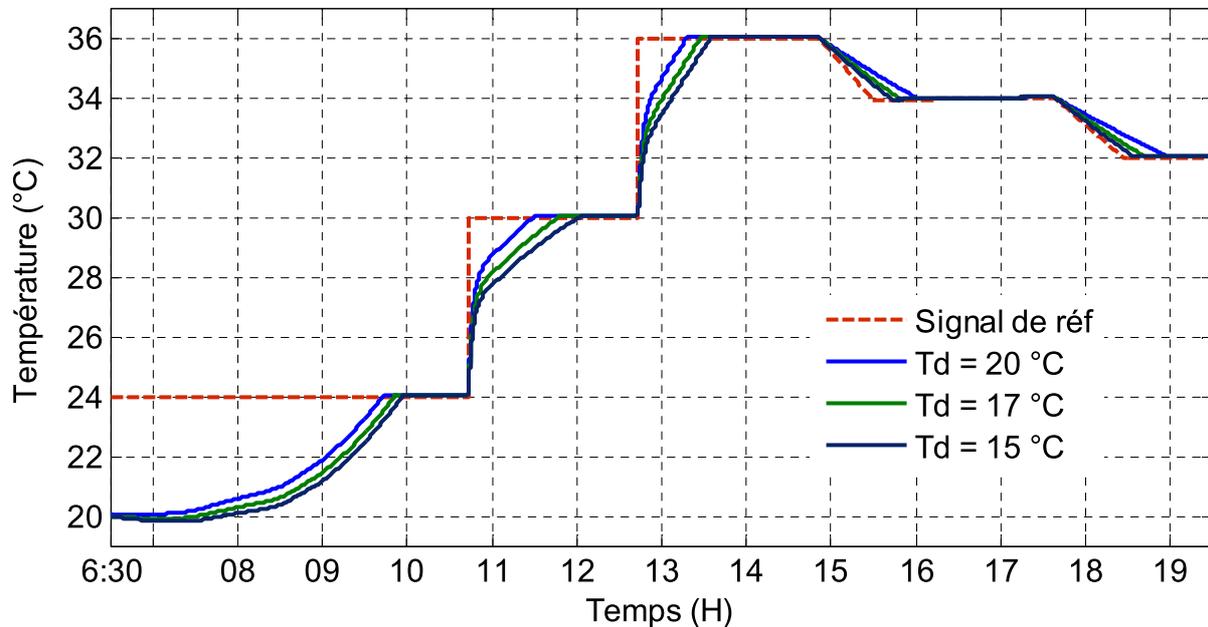


Fig 4.18 Effet de variation de la charge (la température T_d)

IV.9 Conclusion

Ce chapitre a résumé la théorie des systèmes non-linéaires commandés par mode de glissement, ainsi que les différentes structures de commande pour comprendre le fonctionnement du régulateur à structure variable. Nous avons, ensuite, abordé la conception de la commande par mode de glissement avec ses différentes étapes, puis nous avons appliqué cette dernière sur la commande du chauffe-eau solaire, et enfin, nous avons discuté les résultats de simulation.

Les résultats de simulation ont montré clairement les performances du contrôleur par mode de glissement, ainsi que la robustesse par rapport aux perturbations de l'éclairage solaire, aux variations paramétriques et aux variations de la température de charge.

Pour comparer les performances et la robustesse du contrôleur par mode de glissement par rapport aux autres contrôleurs, nous effectuerons une comparaison entre les différents contrôleurs, au chapitre suivant.

Chapitre V

Etude Comparative

V.1 Introduction

Dans cette étude, nous allons examiner les différentes lois de commande développées pour le chauffe-eau solaire. Les critères de comparaison sont : le premier est le critère de performance, le deuxième est relatif à l'erreur statique et le troisième critère est le critère concernant la commande appliquée que nous pouvons considérer comme un critère énergétique..

Cette comparaison est effectuée dans des conditions opératoires identiques tels que le signal de référence, les paramètres du système, les perturbations, les températures ambiantes et la température de l'eau froide ainsi que pour des paramètres de simulation identiques, tel que le temps d'échantillonnage et la durée de simulation.

V.2 Tests de performances

Pour examiner les performances de différentes lois de commande appliquées pour le chauffe-eau solaire, nous avons choisi une journée sans perturbations du 28/10/2014 au niveau du site de l'UDES Bou-Ismaïl (W.Tipaza) (Fig. 5.1). Nous pouvons constater que la température ambiante varie entre 17 °C et 22 °C durant toute la journée (Fig.5.2). Pour cela, nous avons considéré 20°C comme valeur moyenne et initiale pour notre simulation.

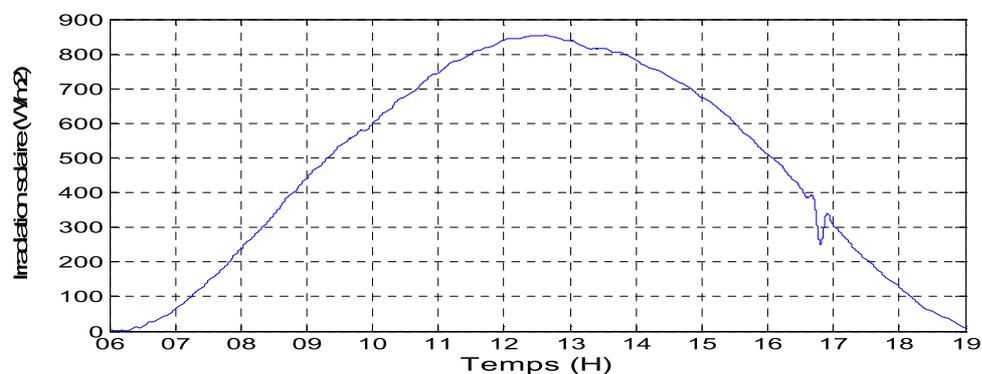


Fig. 5.1 Irradiation solaire du 28/10/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

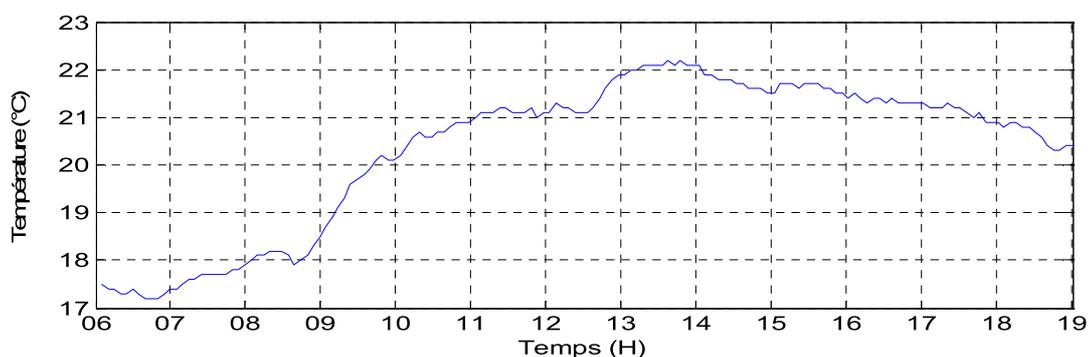


Fig. 5.2 Température ambiante du 28/10/2014 à l'UDES (Bou-Ismaïl).

V.2.1 Commande PI :

Le signal de la réponse, la forme de la commande PI à l'entrée de la pompe du chauffe-eau solaire et l'erreur sont représentées respectivement par la figure (5.3).

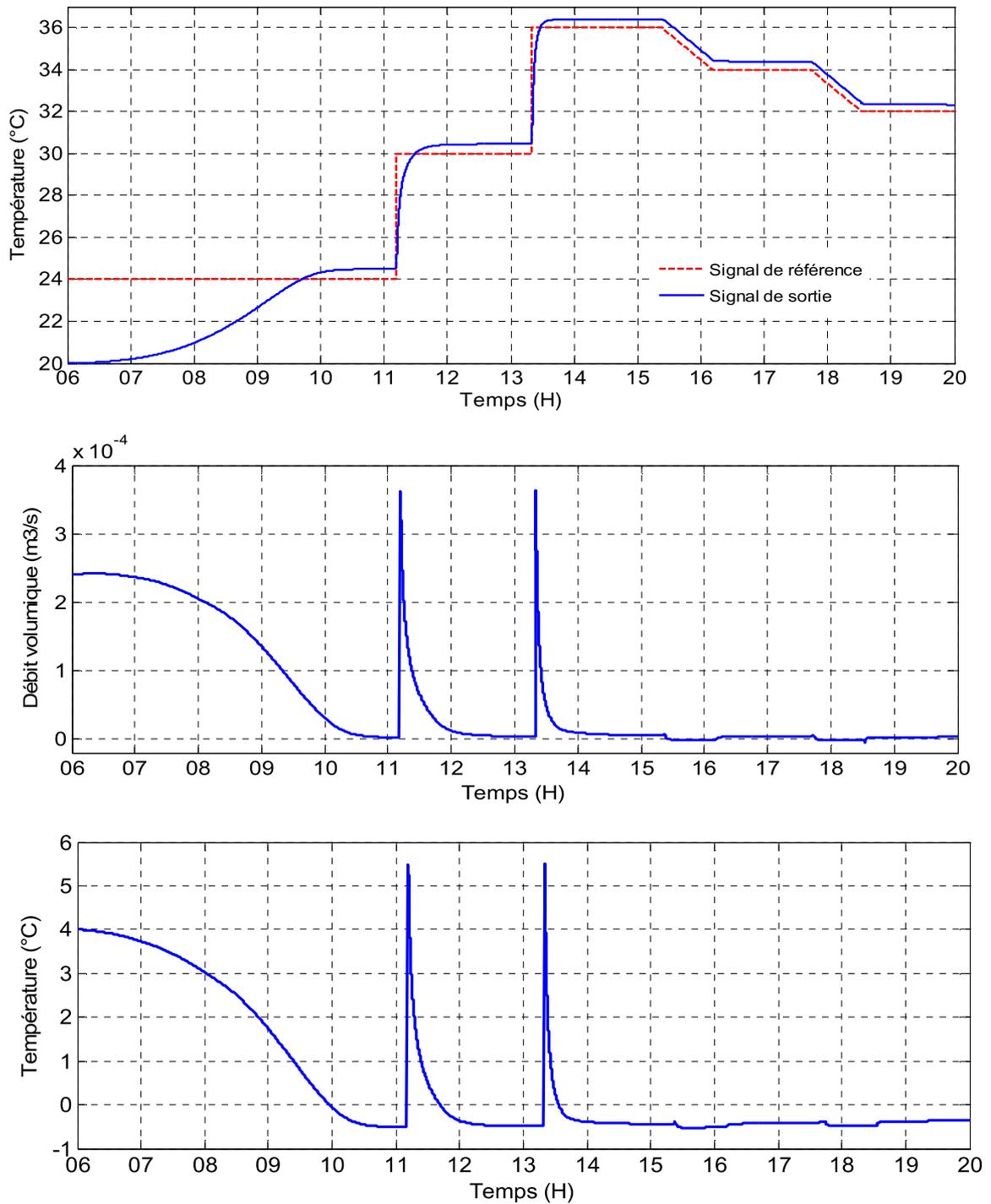


Fig. 5.3 (a) Signal de sortie avec le régulateur PI,

(b) Variation de l'erreur PI, (c) La commande PI

V.2.2 Commande GPC :

Le signal de la réponse, et la forme de la commande GPC à l'entrée de la pompe du chauffe-eau solaire et l'erreur sont représentées respectivement par la figure (5.4).

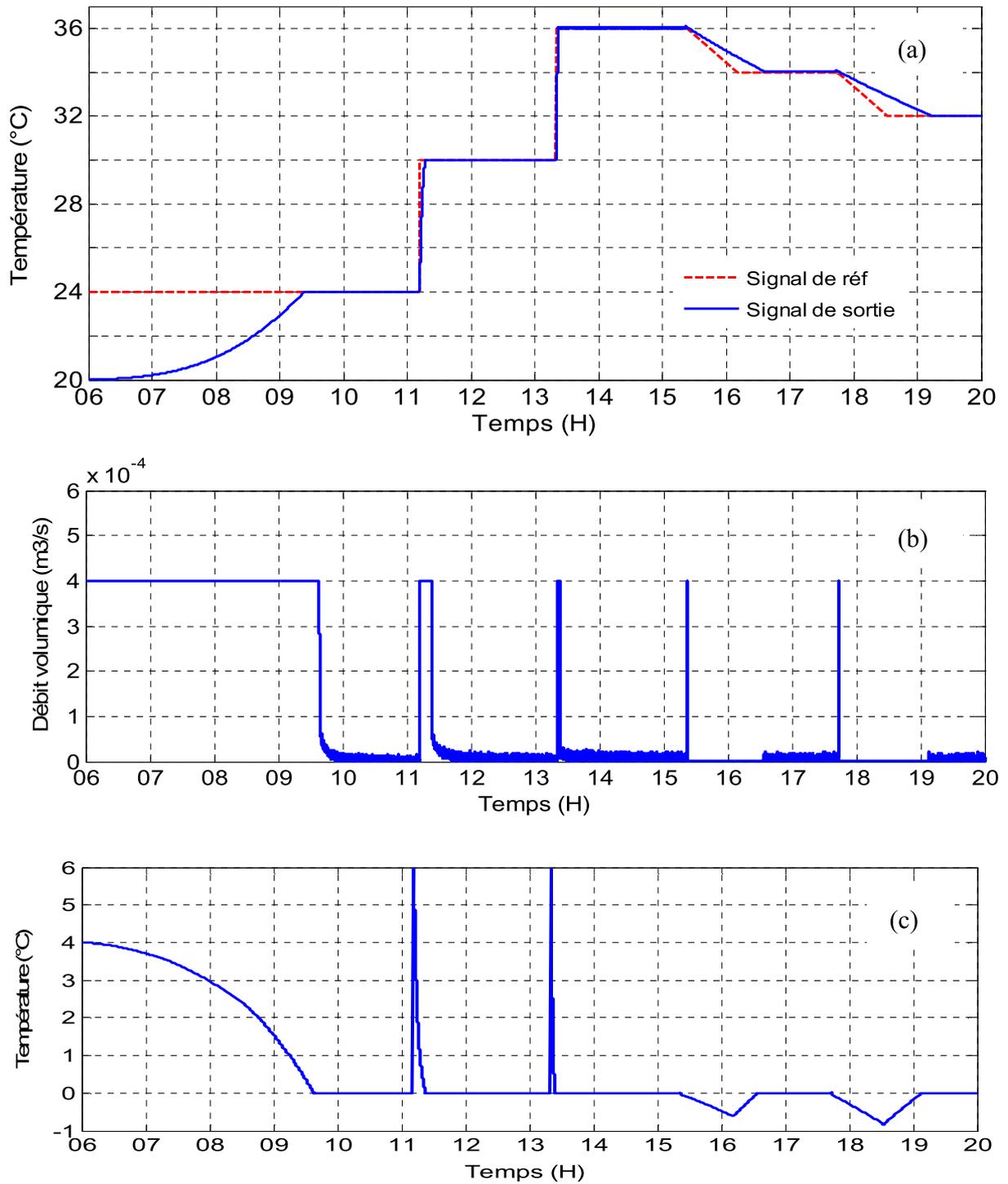


Fig. 5.4 (a) Signal de sortie avec le régulateur GPC,

(b) Variation de l'erreur GPC, (c) La commande GPC

V.2.3 Commande par mode de glissement :

Le signal de la réponse, la forme de la commande par mode de glissement à l'entrée de la pompe du chauffe-eau solaire et l'erreur sont représentées respectivement par la figure (5.5).

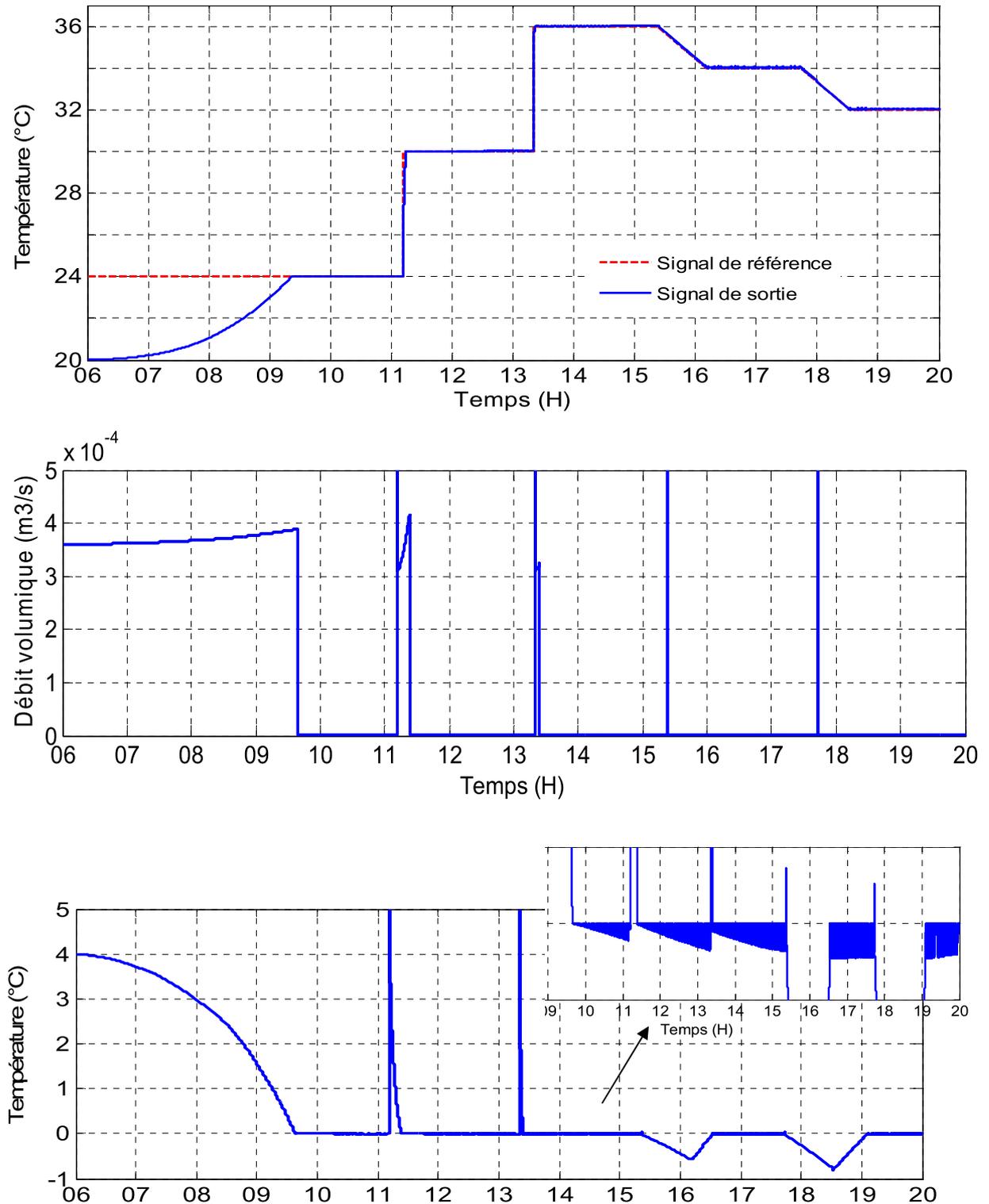


Fig. 5.5 (a) Signal de sortie avec la La commande par MG,

(b) Variation de l'erreur MG, (c) La commande par MG

Les réponses de différentes lois de commande appliquées au chauffe-eau solaire sont représentées dans la figure 5.3.

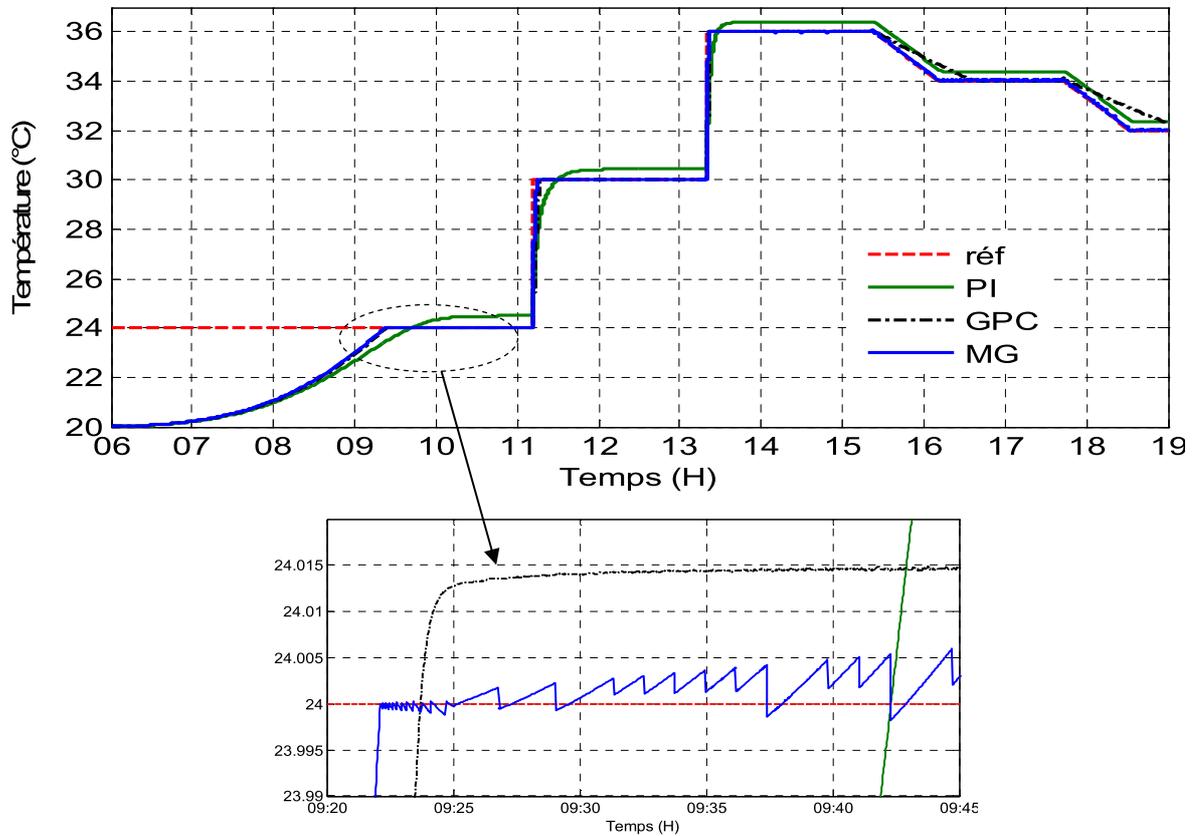


Fig. 5.6 Réponse du signal de sortie. (T_s) au différents commande appliquées

Le tableau 5.1 montre les performances des trois commandes (PI, GPC, MG). La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire. Nous constatons que la commande par mode de glissement est la commande la plus rapide.

	Temps de réponses (tr) 5%	Temps de montés (tm)	Erreur statique
PI	12892 s = 3h 35min 2s	13338 s = 3h 42min 18s	0.488 V
GPC	11978 s = 3h 19min 38s	12222 s = 3h 23min 42s	0.015 V
MG	11884 s = 3h 18min 4s	12127 s = 3h 22min 7s	0.0025 V

Tableau 5.1: Test de performance des trois commandes appliquées

La précision d'un contrôleur est basée sur l'erreur statique entre le signal de référence et le signal de sortie (T_s). Le tableau 5.1 montre que la commande par mode de glissement est la commande la plus précise par rapport aux autres commandes.

V.3 Comparaison énergétiques des trois commandes

Le tableau 5.2 montre la comparaison entre les trois commandes appliquées. Les critères de comparaisons sont le critère énergétique de la commande (j_1) et le critère énergétique de l'erreur (j_2).

$$j_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (u^T \cdot u)$$

$$j_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (e^T \cdot e)$$

avec : u est la commande et e est l'erreur.

	Commande PI	Commande GPC	Commande par mode de glissement
$j_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (u^T \cdot u)$	2.87 e-004	11 e-004	67 e-004
$j_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (e^T \cdot e)$	6.83 e+004	6.31 e+004	6.20 e+004

Tableau 5.2 Comparaison de l'énergie de la commande et de l'erreur des trois commandes appliquées

Le tableau 5.2 ainsi que la figure 5.4 montrent que la commande PI présente le moins d'énergie par rapport aux autres commandes. Cependant l'énergie de l'erreur de la commande par mode de glissement est la plus faible.

La commande prédictive marque un léger retard par rapport à la commande par mode de glissement à cause des contraintes prises en compte dans le processus ; le calcul de l'entrée de commande devient beaucoup plus difficile.

La commande prédictive reste la commande préférable et la commande la plus utilisée dans le domaine du contrôle des systèmes solaires thermiques et cela revient, essentiellement, aux traitements de différents types de contraintes sur les différentes variables ainsi que la compensation des temps morts. Cependant, le plus grand inconvénient de la commande prédictive est la nécessité d'un modèle approprié du système.

Bien que la commande par mode de glissement montre des performances de rapidité, de précision (Tableau 5.1) et de robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle; elle est très peu utilisée dans le domaine du contrôle des systèmes solaires thermiques car elle ne prend pas en charge les contraintes pendant la conception de la loi de commande.

V.4 Conclusion

Ce chapitre présente une étude comparative entre les différentes commandes développées pour le chauffe-eau solaire. Le critère de performance montre que la commande par mode de glissement est la commande la plus rapide et la plus robuste. En plus, le critère énergétique montre que les commandes MPC et MG sont des commandes moins énergétiques par rapport à la commande PI.

En dépit du retard de la commande prédictive observé par rapport à la commande par mode de glissement dû aux calculs des contraintes, la commande prédictive est très utile pour l'industrie et surtout pour le contrôle solaire et elle reste la meilleure commande pour le contrôle des systèmes solaires car elle peut compenser les temps morts et gérer les différentes contraintes que ce soit dans les systèmes non linéaires (SISO) ou (MIMO).

Conclusion générale

Les travaux, présentés dans ce mémoire, portent sur la mise en œuvre d'un nouveau modèle et l'étude de la commande d'un chauffe-eau solaire. Les principaux objectifs sont :

- La modélisation du système solaire thermique: élaboration d'un nouveau modèle basée sur une modélisation détaillée du système de chauffage d'eau solaire,
- Le développement de la loi de réglage et la simulation de la commande prédictive généralisée du système considéré,
- Le développement et la simulation de la commande par mode de glissement du système,
- La comparaison des lois de commande appliquées au système de chauffe-eau solaire permettant une évaluation des performances du système.

Le premier chapitre du mémoire a été consacré à une présentation succincte sur le rayonnement solaire extraterrestre et terrestre ainsi que sur l'énergie renouvelable et la fin de ce chapitre à l'étude du fonctionnement du chauffe-eau solaire dans lequel s'inscrivent les travaux présentés de ce mémoire.

L'étude menée dans le deuxième chapitre a permis de proposer un modèle dynamique original du chauffe-eau solaire forcé, suivi d'une linéarisation du système. Ensuite, des lois de commande ont été synthétisées en commençant par un réglage de type PI.

Après le modèle dynamique et linéarisation du système, le troisième chapitre est venu pour compléter le chapitre précédent en appliquant la commande prédictive. Dans ce chapitre, nous avons expliqué, en détail, la technologie de commande prédictive. Puis, nous nous sommes intéressés, en particulier, à un type de commande prédictive qui est la commande prédictive généralisée non linéaire continue pour l'appliquer au chauffe-eau solaire. Enfin, nous avons relevé les performances et la robustesse de la commande prédictive généralisée. Ainsi, nous avons étudié l'effet de fortes variations de la radiation solaire globale sur la robustesse du modèle. Nous pouvons conclure que les grands avantages de la commande prédictive, c'est la robustesse par rapport aux perturbations et la capacité de gérer les contraintes que ce soit à l'entrée du système ou sur les variables des états ou sur les variables des sorties. Aussi, nous avons constaté que la commande prédictive convient parfaitement aux systèmes dont leurs comportements dynamiques ont des temps de retard considérables.

Le quatrième chapitre était un résumé sur la théorie des systèmes non-linéaires commandés par mode de glissement, ainsi que différentes structures de commande pour comprendre le fonctionnement du régulateur à structure variable. Nous avons, ensuite, abordé la conception de la commande par mode de glissement avec ses différentes étapes puis, nous avons appliqué cette

dernière sur la commande du chauffe-eau solaire, et enfin, nous avons présenté et discuté les résultats de simulation.

Les résultats de simulation montrent clairement les performances du contrôleur par mode de glissement, ainsi que la robustesse vis-à-vis aux perturbations de l'éclairement solaire, aux variations paramétriques et aux variations de la température de charge.

Les résultats de la comparaison entre les trois commandes développés montrent les performances (rapidité et précision) de la commande prédictive et la commande par mode de glissement.

D'après les résultats obtenus et les observations enregistrées, il serait très intéressant de passer à la réalisation pratique. Par ailleurs, des perspectives de recherche intéressantes pourraient contribuer à une meilleure exploitation de la commande du chauffe-eau solaire:

1. Les inconvénients de MPC sont l'effort de conception du modèle dynamique, l'effort de calcul pour résoudre le problème d'optimisation et enfin les incertitudes dans les prévisions ou les connaissances limitées et les simplifications dans la dynamique du système. Afin d'éviter la construction du modèle mathématique, il serait proposé de construire une commande prédictive basée sur la logique floue ou les réseaux de neurone.
2. Sachant que la commande par mode de glissement montre des performances de rapidité, de précision et de robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle, et sachant la capacité de la commande prédictive généralisée à gérer les contraintes, les deux commandes peuvent être combinées, pour élaborer une commande hybride.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Filipov, Equations différentielles à second membre discontinu, journal de mathématiques, Tome 51, N°1, 1960.
- [2] A. Sabanovic, Variable structure systems with sliding modes in motion control—a survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 7, No. 2, 2011.
- [3] B. Bourret, les échangeurs de chaleur, Département de Génie Civil, INSA Toulouse, 2011.
- [4] B. Drazenovic, The invariance conditions in variable structure systems, *Automatica*, vol. 5, no.3, pp. 287–295, 1969.
- [5] Bechi.C, S. Gabsi, Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré dans des conditions réelles, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°2 (2006).
- [6] Boudjana. S, M. Tadine, M.S. Boucherit, M. Hatti, Generalized predictive control of solar water heater, 3rd international Conference IPEE, Tebessa, Algeria 2014.
- [7] Boudjema, F. Commande par mode de glissement: Application aux convertisseurs électriques, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1991.
- [8] Brosilow. C, Joseph, B, Techniques of Model-Based Control, Prentice Hall Prof, New York, 2002.
- [9] Buhler, H. Réglage par mode de glissement. Presses Polytechniques Romandes, 1986.
- [10] Camacho, E.F., Berenguel, M.: Application of generalized predictive control to a solar power plant. In: Proc. of the Third IEEE Conf. on Control Applications, Glasgow, UK, pp. 1657–1662, 1994.
- [11] Camacho. E.F, Constrained generalized predictive control, *IEEE Trans. Autom. Control* 38(2), 327–332, 1993.
- [12] Camacho. E. F., C Bardons, Model Predictive Control, Springer, 2007.
- [13] Camacho.E.F, M. Berenguel, F.R.Rubio,D.M, Control of Solar Energy Systems. Springer, 2012.
- [14] Camacho E.F., Berenguel. M, Application of generalized predictive control to a solar power plant. In: Proceedings of the EC Esprit/CIM CIDIC Conference on Advances in Model-Based Predictive Control, Oxford, UK, vol. 2, pp. 182–188, 1993.
- [15] Christensen.M.G, J.Adler-Nissen, Simplified equations for transient heat transfer problems at low Fourier numbers, University of Denmark; Applied Thermal Engineering, elsevier 76 (2015).
- [16] Cirre, C.M, Berenguel, M., Valenzuela, L., Camacho, E.F, Feedback linearization control for a distributed solar collector field. *Control Eng. Pract.* 15, 1533–1544, 2007.
- [17] D. Matko, K.K-B, Generalized Predictive Control of a Heat Exchanger Using Fuzzy Model, IEEE, 2000.
- [18] D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs. Generalized predictive control—part I : the basic algorithm. *Automatica*, Vol. 23, No. 2, pp. 137–148, 1987.
- [19] D.W Clarke, C. Mohtadi, P.S. Tuffs, Generalized Predictive Control, Part II: Extensions and Interpretation, *Automatica*, 23 (2), 137-160, 1987.
- [20] D.W. Clarke. Application of Generalized Predictive Control to Industrial Processes. *IEEE Control Systems Magazine*, 122:49-55, 1988.
- [21] Farkas. I, Vajk, I, Experiments with robust internal model-based controller for Acurex field, Research Results at PSA With in the Year 2002 Access Campaign. CIEMAT, Madrid, 2003.
- [22] Farkas. I, Vajk, I, Internal model-based controller for a solar plant. In: Proc. of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [23] Farkas. I., Vajk, I, Modeling and control of a distributed solar collector field. In: Proc. of the Energy and Environment Congress, Opatija, Croatia, 2002.
- [24] Francesco Dinuzzo and Antonella Ferrara, Higher Order Sliding Mode Controllers With Optimal Reaching, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(9), 2009.
- [25] Fu. Jian, W. Qingxian, C. Wenhua, Y. Xinggang, Chattering-free condition for sliding mode control with unidirectional auxiliary surfaces, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013.
- [26] <http://www.eco-conscient.com/art-53-centrale-solaire-thermique-de-kramer-junction-californie.html>, 12.2014.
- [27] <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>, 12/2014.
- [28] J. A.Duffie, W.Beckman, Solar Solar Engineering of thermal processes, AWiley-Interscience Publication, June 1980.

- [29] J. E. Slotine, The robust control of robot manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 4:49–63, 1985.
- [30] J. M. Maicejowski, *Predictive Control With Constraints*, Prentice-Hall, 2001.
- [31] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, J. Papon. Algorithmic control of industrial processes. *Proceedings of the Fourth IFAC symposium on identification and system parameter estimation*, pp. 1119–1167, 1976.
- [32] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud & J. Papon. Model predictive heuristic control: Application to industrial processes. *Automatica*, Vol. 14, pp. 413–428, 1978.
- [33] J.J. Slotine, *Applied Non Linear Control*, Prentice hall, 1992.
- [34] J.M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, Pearson Education - Prentice Hall, 2002
- [35] J.Y. Hung, W. Gao, J.C. Hung. Variable structure control-a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(1), 1993.
- [36] Jacques Bernard, *Energie Solaire Calcule et optimisation*, édition ellipses 2011.
- [37] J. Adamy and A. Flemming, Soft variable-structure controls-a survey, *Automatica*, vol.40, no.11, pp.1821–1844,Nov.2004.
- [38] Karaghoul AA, Alnaser WE Experimental study on thermosyphon solar water heater in Bahrain. *Renew Energy* 24:389–396, 2001.
- [39] Kreith F, Kreider JF, *Principles of solar energy*. Hemisphere Publishing, Washington.DC, 1978.
- [40] L. M.: Predictive control of a distillation column using a controloriented neural model. *ICANNGA 2011, Part I. LNCS*, vol. 6593, pp. 230–239. Springer, 2011.
- [41] L.M.: Accuracy and computational efficiency of suboptimal nonlinear predictive control based on neural models. *Applied Soft Computing* 11, 2011.
- [42] L.M.: Nonlinear predictive control based on multivariable neural Wiener models. A., *ICANNGA 2011, Part I. LNCS*, vol. 6593, pp. 31–40. Springer, 2011.
- [43] Lee. H, V.Utkin, *Advances in Variable Structure and Sliding Mode Control*, *Lecture Notes in Control and Information Sciences* (Vol. 334). Berlin, Springer 2006.
- [44] Levant A, *Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control*, *International Journal of Control*, 1993.
- [45] MEFTA.H.M.Salah, *Etude théorique et Application pratique d'un système de chauffe-eau solaire en vue de la production de l'eau chaude sanitaire*, Mem de magister, Univ de Ouargla, 2004.
- [46] M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,*Jornal of power electronics*, ,May 2009.
- [47] M. Marcelin Dabo, *Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes*.these de doctorat. Université de Rouen, 2010.
- [48] M. Morari, C.E. Garcia, D. M. Prett. Model predictive control : theory and practice – a survey, *Automatica*, Vol. 25, No. 3, pp. 335– 348, 1989.
- [49] M.S. Chen, Y.R. Hwang and M. Tomizuka, A State-Dependent Boundary Layer Design for Sliding Mode Control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002.
- [50] Mervyn Smyth, J. Russell, T. Milanowski, *Solar energy in the winemaking industry*, Springer 2011.
- [51] Padet J., *Echangeurs thermiques*, Masson, BIB'INSA, 1993.
- [52] R. E. Kalman. Contributions to the theory of optimal control. *Bulletin de la Société Mathématique de Mexicana*, Vol 5, pp. 102–119, 1960.
- [53] R.Kicsiny,Z.Varga, *Real-time state observer design for solar thermal heating systems*, Elsevier 2012.
- [54] Ramond, G., Dumur, D, Libaux, A., Boucher, P.: Direct adaptive predictive control of an hydro-electric plant. In: *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 606–611, Mexico, 2001.
- [55] René Husson, *Méthode de commande des machines électriques*, Lavoisier, Paris, France, 2003.
- [56] Roca, L., Berenguel, M., Yebra, L., Alarcón-Padilla, D.: Solar field control for desalination plants. *Sol. Energy* 82, 772–786, 2008.
- [57] Roca. L, Guzmán, J.L, Normey-Rico, J.E., Berenguel, M., Yebra, L, Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field. *Control Eng. Pract.* 17, 1076–1088, 2009.
- [58] Rubio, F.R.: adaptive control of industrial processes, application to a solar plant, phd thesis, universidad de sevilla, Spanish, 1985.

- [59] S. V. Emelyanov, Variable structure control systems. Nauka, Moscow, 1967.
- [60] S.V.Emelyanov, Control of first order delay systems by means of an astatic controller and nonlinear corrections, *Autom. Remote Control*, vol. 8, pp. 983–991, 1959.
- [61] Sako MK, N,Guessan Y, Andoh HY, Koffi PME, Gbaha P, Sangare MK Economical and technical viability of a thermosyphon solar water heater in Cote D’Ivoire. *J Appl Sci*7:3977–3982, 2007.
- [62] Solar energy center, Solar radiation handbook. MNRE Indian Meteorological Society, 2008.
- [63] Soteris Kalogiro, Solar energy engineering Processes and Systems, Elsevier inc, 2009.
- [64] Soteris Kalogiro, Papamarcou C, Modeling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. *Renew Energy* 21:471–493, 2000.
- [65] Soteris Kalogiro, Solar thermal collectors and applications. *Prog. Energy Combust.* Elsevier inc, 2004.
- [66] Soteris Kalogiro. The potential of solar industrial process heat applications, *Appl Energy*;76:337–61, 2003.
- [67] Stine WB, Harrigan RW, Solar energy fundamentals and design. Wiley, New York, 1985.
- [68] T. Zaharieva ‘Commande a structure variable appliquée a un moteur synchrone’, thèse pour l’obtention du Diplôme de Recherche de l’INSA de Toulouse, France, 2000.
- [69] T.Ferhatbegovi c, G.Zucker, P.Palensky, An Unscented Kalman Filter Approach for the Plant-Model Mismatch Reduction in HVAC System Model Based Control, *IEEE*, 2012.
- [70] T.Ferhatbegovi c, G.Zucker, P.Palensky, Model Based Predictive Control for a Solar-Thermal System,
- [71] T.K. Ghosh, M.A. Prelas, Energy Resources and Systems: V2, Renewable Resources, Springer Science, 2011.
- [72] Tiwari GN, Solar energy: fundamentals, design, modeling and applications. CRC, New York, 2002.
- [73] U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE): Buildings Energy Data Book, 2011.
- [74] Utkin. V. I., Guldner. J, Shi. J, Sliding mode control in electromechanical systems. London: Taylor and Francis, 1999.
- [75] V. I. UTKIN, Discontinuous control system: State of art in theory and application, Institute of Control Sciences, Ed. MIR, Moscou, 1978.
- [76] V. I. UTKIN, Sliding modes and their application in variable structure systems, Edition MIR, Moscou, 1978.
- [77] V.I. Utkin. sliding modes in control and optimization. springer-verlag, Berlin, 1992.
- [78] V. Smil, energies, the mit presse, Cambridge (MA), 1999.
- [79] Vidal. P.E, Commande non linéaire d’une machine asynchrone à double alimentation., thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [80] W. Perruquetti, J P Barbot, Sliding mode control in engineering, NEW YORK, BASEL, 2002.
- [81] W. H. Kwon and D. G. Byun, “Receding horizon tracking control as a predictive control and its stability properties,” *International Journal of Control*, vol. 50, pp. 1807–1824, 1989.
- [82] W. H. Kwon, S. Han, receding horizon control, model predictive control, for state models. springer, 2005.
- [83] Willigenburg.van, L.G., Bontsema, J., Koning, W.L.D., Valenzuela, L., Cirre, C.M.: Digital optimal reduced-order control of a solar power plant. In: *Proc. of UKACC-IEE CONTROL 2004*, University of Bath, UK, 2004.
- [84] Winston Garfa-Gabin, E. F. Camacho, Application Of Multivariable GPC to a Four Tank Process With Unstable Transmission Zeros, *IEEE*, 2002.
- [85] X. Yu, O. Kaynak, O. Sliding-Mode Control With Soft Computing: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(9), 2009.
- [86] Young. K-K. D, controller design for a manipulator using theory of variable structure systems, man, and cybernetics. Vol. 8, Issue: 2, *IEEE*, 1978.
- [87] Yu. Shiming, Wang Haiquing Wang Xingang, novel generalized predictive control algorithm with application, proceedings, TENCON 02, 2002 IEEE region 10.